طراحی سازه های مقاوم در برابر انهدام پیشرونده با روشهای آئین نامه

سارا دانشور[۱] ، میلاد کلبه داری[۲]

[۱]کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

[۲]کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

Email: s.daneshvar87@gmail.com
Email: milad_kolbehh@yahoo.com

چکیده:

خرابی پیش رونده عبارت است از انتشار اسیب اولیه ناشی از یک واقعه اغازگر از یک جز به اجزای دیگر که عموما در بخش نسبتا کوچکی از سازه اتفاق می افتد. با وجود اینکه احتمال وقوع این پدیده زیاد نمی باشد اما در مواقع رخداد انهدام پیش رونده خسارات مالی، جانی و امنیتی جدی وارد می شود که این باعث اهمیت بیشتر پیشگیری از وقوع حوادثی از این قبیل خواهد گردید . در این مقاله یک ساختمان بتن آرمه قاب خمشی مطابق آئین نامه های مقررات ملی ایران طراحی و سپس همان سازه در برابرخرابی پیش رونده طراحی می شود . روش های تحلیلی ایین نامه ای بر اساس حذف عضو باربر از سازه استوار هستند لذا اثر انهدام ستون های کناری، گوشه و میانی در طبقه اول بررسی شده است. سپس خرابی پیش رونده سازه مورد مطالعه در شرایط بحرانی ارزیابی می شود و در نهایت عملکرد و اقتصادی بودن طرح بررسی شده تا بتوان این نیاز را پوشش داد. پس از ارزیابی نتایج دریافتیم که کاربری سازه در حساسیت آن در خرابی پیش رونده نقش مهمی ایفا می کند و در مدل بررسی شده اگر چه معیار های پذیرش انالیز دینامیکی غیر خطی تایید شده است ولی تیرهای قاب های غیرکناری نقطه اتصال به ستون دوم از ابتدا و انتهای قاب و تکیه گاه های کناری سازه با توجه به نتایج آنالیز استاتیکی غیر خطی نیاز به اصلاح و تقویت را نشان می دهند . با استناد به نزدیک بودن برآورد تغییر شکل سازه و لنگر های تیرها در آنالیز استاتیکی خطی و غیر خطی با آنالیز دینامیکی غیر خطی، اندازه های برش های به دست امده در تیر ها از تحلیل دینامیکی غیر خطی بسیار کمتر از سایر تحلیل ها می باشد .

واژه‌های کلیدی:

خرابی پیش رونده ، سازه بتن ارمه قاب خمشی، انالیز غیر خطی، طرح مقاوم، باز پخش بارها، ایین نامه ها، اصلاح مقاطع اولیه، انهدام سازه

۱- مقدمه:

عموما وقتی در اثر انفجار یا حوادث پیش بینی نشده تصادفی، یکی از اعضای باربر اصلی ساختمان مانند ستون یا دیوار باربر آن که جزو اعضای کلیدی ساختمان تلقی می شوند تخریب می گردد، این تخریب تمام اعضای سازه ای را کـه بـه نـوعی بـه آن عضـو کلیدی متکی بودند، متاثر می سازد، برای مثال با انهدام ستون، سقف طبقه فوقانی که عضو کلیدی ستون در نقش تکیـه گـاه آن بود نیز تخریب می شود، این تخریب به نوبه خود منجر به آسیب به سایر قسمت های سازه می گردد و ایـن تـوالی ممکـن اسـت آنقدر ادامه پیدا کند که منجر به تخریب کل سازه یا بخش زیادی از آن گردد. در صـورتی کـه المـان هـای مجـاور ظرفیـت ایـن بازتوزیع بار را داشته باشد، خرابی اولیه گسترش پیدا نمی کند اما در صورت گسیختگی المان های مجاور، دوباره، بار این اعضا بـه همراه بار ناشی از خرابی اولیه به تیرها و ستون های دورتر منتقل می شود و در این مرحلـه اعضـای دورتـر در معـرض بـازتوزیع مجدد بار و ممان قرار می گیرند که در صورت عدم مقاومت کافی، خرابی گسترده تری به وقوعمی پیوندد و خرابی اولیه به خرابی پیش رونده تبدیل می شود.

انهدام پیش رونده به لحاظ فیزیکی کاملا فهمیده شده است. با این حال، تمثال ریاضیاتی آن هنوز نیازمند روشنگری، توضیحات و بهبود است. در این مقاله، ما تلاش می کنیم از طریق ساده سازی و با انجام چهار تحلیل متفاوت پدیده انهدام پیش رونـده را بـه لحاظ مفهومی توضیح دهیم : استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی، دینامیکی خطی و دینامیکی غیرخطی. این کار از تحلیل یـک ساختمان قاب خمشی بتن آرمه پنج طبقه با از دست دادن یک ستون از طبقه اول انجام می شود. تحلیل با استفاده از نـرم افـزار تجاری SAP2000 انجام می شود هرچند که روندهای مشخص شده در این مقاله می توانند با هر نـرم افـزار کـامپیوتری المـان محدود که توانایی تحلیل دینامیکی غیرخطی را دارد، دنبال شود.

تحلیل انهدام پیش رونده با حذف ناگهانی یک یا چند عضو از المان های باربر و تحلیل توانایی باقی مانده سازه جهت جذب آسیب انجام می شود. این موضوع نیازمند آن است که برنامه کامپیوتری توانایی انجام چنین تحلیل هایی را داشته باشند. حال آنکه نـرم افزارهایی با چنین قابلیتی بسیار گران قیمت هستند. به عنوان جایگزین، مرجانیش ویلی و بوسمی[۱] در سال ۲۰۰۵ نشان دادند که می توان تحلیل انهدام پیش رونده را با شرایط اولیه توسط نرم افزار های کامپیوتری انجام می شود.

موضوع کلیدی در انهدام پیش رونده فهم آن است که این واقعه دینامیکی می باشد و حرکت، با آزاد کردن انرژی داخلی در اثر از دست دادن لحظه ای عضو سازه ای، شروع می شود. این از دست دادن عضو تعادل اولیه بارهای خارجی و نیروهـای داخلـی را از بین می برد و سازه سپس دچار ارتعاش می شود تا زمانی که جایگاه تعادل جدیدی پیدا شود یا تا زمانی که سازه منهدم شود.

با وجود اینکه چهار روش تحلیل ارائه شده در این مطالعه می توانند مستقلا به کار برده شوند، با توجه بـه اینکـه مکمـل یکـدیگر هستند توصیه می شود روش ترکیبی تحلیل انهدام پیش رونده استفاده شود. برای این کار ابتدا از متد ساده تر استاتیکی شـروع می کنیم و پس از آن پیچیدگی در روش تحلیل به مقدار مورد نیاز افزایش می یابد تا جایی که احتمال انهدام پیش رونده پایین تعیین شود و یا همه روش های مهندسی موجود مستهلک شوند.

۲- هدف:

هدف اصلی این مقاله فراهم کردن روند گام به گام برای چهار روش به ترتیب پیچیدگی جهت تحلیل انهدام پیش رونده با استفاده از نرم افزار تحلیل سازه تجاری SAP2000 می باشد. هدف ما این است که توضیحات گام ها آنقدر روشن باشـد کـه بـه راحتـی فهمیده شوند و مهندسان مجری از آن استفاده کنند و در نهایت مقایسه ای بین روش های تحلیل انهدام پـیش رونـده و تفـاوت تحلیل با پیروی از الزامات آئین نامه های متفاوت می باشد. رویکرد به شرح زیر است :

۱. تحلیل و طراحی ساختمان های نمونه با استفاده از آئین نامه های طراحی ایران
۲. تحلیل ساختمان نمونه با استفاده از آئین نامه های انهدام پیش رونده داخلی و خارجی با چهار روش تحلیل متفاوت : استاتیکی خطی، استاتیکی عیرخطی، دینامیکی خطی، دینامیکی غیرخطی.
۳. مشخص کردن مزایا و معایب و محدودیت های هر یک از چهار روند بر اساس تحلیل نمونه
۴. مشخص کردن نقاط ضعف سازه های نمونه با استفاده از هر یک از آئین نامه ها و تقویت سازه برای مقابله با انهدام پیش رونده
۵. مشخص کردن روش تحلیل منتج به محافظه کارانه ترین پاسخ می شود.

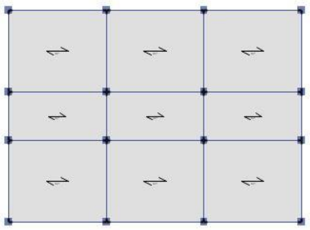
---

[۱] Marjanishvili and Buscemi

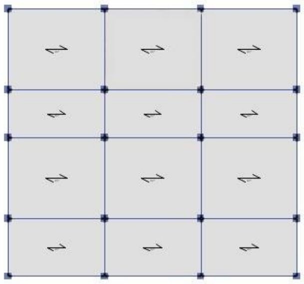
۶. نتیجه گیری و توصیه هایی برای روش تحلیل ارجح بر اساس دقت و سادگی عملکرد

۳- ساخت هندسه و سناریوی حذف :

ساختمان های مورد بررسی دو سازه موجود از نوع قاب خمشی معمولی با اسکلت بتنی ۵ طبقه هستند که پلان آن ها در شکل ۱ مشاهده می شود. ارتفاع طبقه اول ۴/۴۵ متر، ارتفاع بام ۲/۸ متر و ارتفاع سایر طبقات سازه برابر ۳/۶ متر است. ابعاد دهانه ها ۳ ، ۵ و ۶ متر و سقف از نوع دال یک طرفه لحاظ می گردد.



A

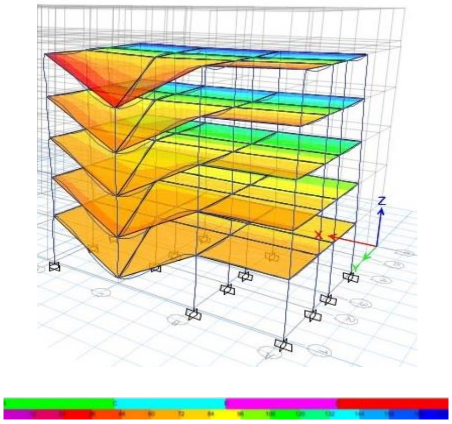


B

شکل ۱. پلان سازه های مورد بررسی

در ساختمان های مورد مطالعه، بتن مصرفی دارای مقاومت فشاری بتن f'_c =250kg/cm^2 و کلیه آرماتورهای به کار رفته در سازه از نوع A3 با مقاومت جاری شدن f_y =4000kg/cm^2 و مقاومت گسیختگی f_u =6000kg/cm^2 هستند. پارامتر مدول الاستیسیته بتن و فولاد نیز به ترتیب برابر با E_c =2.37×10^{5}kg/cm^2 و E_s =2.039×10^{6}kg/cm^2 انتخاب شده است.

برای تحلیل انهدام پیش رونده، آئین نامه های UFC [۱] و GSA [۲] چندین سناریوی حذف الزام می دارند. با این حال، تنها حذف یک المان در هر بار الزامی است. بنابراین هر یک از ستون ها را به ترتیب حذف و نتایج بررسی می شوند. تحلیل مستقل از تهدید انجام می شود و به این معنا است که علت شکست المان در نظر گرفته نشده است. تنها عامل مرتبط این است که المان ناگهان قابلیت تحمل بار را از دست می دهد. در ارتباط با یکی از سناریوهای لازم جهت حذف عضو باربر در ساختمان A، حذف ستون را در مرکز نمای جلو مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. تغییر شکل سازه پس از حذف ستون C1 در طبقه اول از ساختمان A

در آنالیز استاتیکی خطی، مدل از ابتدا با حذف ستون مورد نظر تحلیل می شود حال آنکه در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی غیر خطی، حذف ستون پس از اعمال تغییرشکل ها و نیروهای داخلی ناشی از ترکیبات بارگذاری خرابی پیش رونده انجام شده و این کار با استفاده از تحلیل های غیرخطی با شرایط اولیه[۲] عملی می شود. بدین منظور ابتدا سازه تحت اثر ترکیب بارهای آئین نامه برای آنالیزهای دینامیکی و استاتیکی غیر خطی قرار گرفته و عکس العمل های فوقانی ستونی که باید حذف شود، قرائت می گردند. سپس ستون از مدل حذف گردیده و نیروهای داخلی قرائت شده روی آن گره قرار داده می شوند و حالات تحلیلی جدیدی از نوع استاتیکی غیرخطی تعریف می شوند که با در نظر گرفتن اثر P-Δ از حالت بدون تنش تا اعمال تمامی عکس العمل ها به صورت مرحله به مرحله پیش بروند. در مرحله بعدی مجددا حالات تحلیلی جدیدی از نوع استاتیکی و دینامیکی غیرخطی با شرایط اولیه تعادل تعریف شده و در آن ها نیروهای مخالف عکس العمل های قرائت شده به سازه وارد می گردد. .[۱۰]

۴- سرعت بارگذاری :

در تضاد با اغلب شرایط تحلیل دینامیکی، که یک بار خارجی دینامیکی وارد می شود، در تحلیل انهدام پیش رونده بار خارجی وارد نمی شود. بارهای دینامیکی داخلی، همچون نیروهای اینرسی حذف ناگهانی چندین المان از یک سازه در حالت تعادل، پاسخ را شروع می کنند. شرایط تعادل حالتی از ساختمان است که لحظه ای قبل از آسیب آغازگر است؛ که شامل تمامی بارهای سرویس قائم است، مثل بارهای مرده و زنده. بنابراین سرعت بارگذاری کلید بدست آوردن پاسخ دقیق سازه در تحلیل است. این موضوع به صورت زیر تخمین زده شده است: ابتدا ساختمان با بارهای زنده و مرده بارگذاری شده (بارهای سرویس قائم) و سپس المان های باربر سازه به صورت ناگهانی حذف می شوند. این مسئله به صورت تغییر ناگهانی در ماتریس سختی سازه نشان داده می شود. با این حال، در این مقاله تعادل سازه با اعمال نیروهای عکس العملی داخلی المان های حذف شده به سازه نگهبان نشان داده می شود. آسیب آغازگر با حذف ناگهانی نیروی داخلی (عکس العمل) داخل المان آسیب دیده مدلسازی می شود. .[۱۱]

۵- مرور آئین نامه های موجود :

دو آئین نامه اصلی موجود در آمریکا برای انهدام پیش رونده آئین نامه های تحلیل انهدام پیش رونده و طراحی GSA و حداقل استانداردهای ضد تروریسم برای ساختمان های DoD می باشد. هر دو موسسه برای تعریف روندهایی جهت تحلیل انهدام پیش رونده تلاش های بسیار نموده اند که در زیر خلاصه ای از آن ها توضیح داده شده است.

۵-۱-آئین نامه GSA[۳] :

این آئین نامه راهنمایی ها و الزامات مختصر و مفیدی برای کمک به انتخاب روند تحلیل و ارزیابی نتایج ارائه می کند. انتخاب روند تحلیل مشابه روندهای آئین نامه FEMA [۳] با اندکی تفاوت است. راهنمای GSA به سه روش تحلیل می پردازد: تحلیل استاتیکی الاستیک خطی، تحلیل دینامیکی الاستیک خطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی. هر دو آئین نامه GSA و FEMA استفاده از روندهای تحلیل استاتیکی الاستیک خطی را تحت شرایط خاصی محدود می نمایند، GSA به ساختمان های تا ۱۰ طبقه بالاتر از تراز زمین و FEMA به ساختمان های با ارتفاع کم تر از 100ft. با وجود اینکه آئین نامه GSA استفاده از تحلیل استاتیکی الاستیک خطی را مطلقا محدود به ساختمان های بلندتر از ۱۰ طبقه می نماید، آئین نامه ها در صورت صلاح دید مهندس اجازه استفاده از هر دو روش استاتیکی یا دینامیکی را با توجیح های مناسب می دهند. آئین نامه FEMA محدودیتی برای استفاده از تحلیل دینامیکی الاستیک خطی قرار نمی دهد.

آئین نامه GSA اجازه می دهد سازه های خاصی بر اساس کاربری و تعداد ساکنین از تحلیل انهدام پیش رونده مستثنی شوند. آئین نامه ها شامل فلوچارتی[۴] برای تعیین مبرا شدن یا نشدن یک ساختمان می باشند.

آئین نامه GSA برای تحلیل استاتیکی الاستیک خطی شرایط بارگذاری قائم زیر را الزامی می داند:

$$\text{بار} = 2\times(DL + 0.25LL) \qquad \text{(معادله ۱)}$$

که در آن بار مرده=DL و بار زنده=LL می باشند. ضریب بزرگنمایی دینامیکی ۲ برای در نظر گرفتن آثار کاهش سرعت می باشد.

برای تحلیل دینامیکی الاستیک خطی و تحلیل های غیرخطی آئین نامه GSA بارگذاری قائم زیر را الزام می دارد:

$$\text{بار} = DL + 0.25LL \qquad \text{(معادله ۲)}$$

که در آن بار مرده=DL و بار زنده=LL می باشند. معیار عملکرد برای روندهای تحلیل الاستیک خطی نسبت تقاضا به ظرفیت ها[۵] می باشد و برای روش های تحلیل غیرخطی چرخش های مفصل های پلاستیک[۶] و نسبت های شکل پذیری تغییرشکل ها می باشد.

---

[۲] Initial Condition

[۳] General Services Administration Progressive Collapse Analysis and Design

[۴] Flow Chart

۵-۲- آئین نامه DoD[۷] :

هدف اصلی این آئین نامه فراهم نمودن راهنمایی هایی برای کمینه کردن اثر حملات تروریستی به ساختمان های وزارت دفاع آمریکا[۸] می باشد. این آئین نامه روش های تحلیل دو یا سه بعدی استاتیکی یا دینامیکی الاستیک خطی یا غیرخطی را در نظر می گیرد و این روندهای تحلیل را با جزئیات شرح می دهد. لازمه تعیین احتمال وقوع انهدام پیش رونده، انجام تحلیل مکرر برای روش الاستیک خطی است.

روش تحلیل مکرر شامل حذف المان هایی است که فراتر از ظرفیت نهایی خود رفته اند که با ممان های گیرداری برابر با ظرفیت ممان نهایی متناظر، جایگزین می شوند. سپس مابقی سازه دوباره تحلیل می شود. اگر اعضای اصلی دچار شکست شوند، اثر دینامیکی و بازتوزیع بار در نظر گرفته می شود. عضو منهدم شده به عنوان یک المان سازه ای که در برش یا فشار دچار شکست می گردد و از محل خود بر المان های زیری می افتد، تعریف می شود.

این روش مشابه متد تحلیل پوش آور[۹] قائم است و نتایج بسیار محافظه کارانه ای بدست می آید. اما برای روش تحلیل غیرخطی، مطابق آئین نامه DoD تحلیل مکرر لازم نیست. احتمال وقوع انهدام پیش رونده توسط المان های سازه ای منهدم شده مشخص می گردد. شرایط بارگذاری زیر در آئین نامه وزارت دفاع آورده شده است:

$$\text{بار} = DL + 0.5LL + 0.2W \qquad (\text{معادله}۳)$$

که در آن بار مرده=DL ، بار زنده=LL و بار جانبی باد برای طراحی=W می باشند.

۵-۳- آئین نامه FEMA[۱۰] :

هدف اولیه انتشارات FEMA توسعه راهنماهایی برای بهسازی لرزه ای ساختمان ها می باشد. با وجود آنکه انتشارات FEMA مستقیما در رابطه با روش های تحلیل انهدام پیش رونده صحبت نمی کند، به تفصیل راهنمایی هایی برای انتخاب روند تحلیل ارائه می نماید که برای مهندسان بسیار کاربردی می باشند. علی الخصوص برای تخمین پاسخ سازه، روش های تحلیل ساده تر به روش های پیچیده تر ارجح می باشند. روش هاس ساده تر حلیل شامل روش های تحلیل دو بعدی و سه بعدی استاتیکی الاستیک خطی می باشند در حالی که روندهای تحلیل پیچیده شامل روش تحلیل سه بعدی استاتیکی یا دینامیکی غیرخطی هستند. آئین نامه FEMA به وضوح مرزهای مشخصی برای استفاده از هر یک از روندهای تحلیل تعیین نموده است.

۶- انتخاب روند تحلیل :

دو رویکرد کلی طراحی برای به حداقل رساندن پتانسیل انهدام پیش رونده در ASCE [۴] و UFC تعریف شده است که عبارتند از رویکرد طراحی غیر مستقیم و رویکرد طراحی مستقیم .

در رویکرد طراحی غیر مستقیم تلاش بر این است تا از طریق فراهم کردن سطح حداقلی از مقاومت، پیوستگی و شکل پذیری از انهدام پیشرونده سازه جلوگیری شود. بهبود جزئیات اتصالات، ارتقاء نامعینی و شکل پذیر کردن سازه نمونه هایی از این تلاشها می باشد.

---

۵ Demand Capacity Ratio (DCR)

۶ Plastic Hinge

۷ Department of Defense Interim Antiterrorism

۸ Department of Defense (DoD)

۹ Pushover

۱۰ Federal Emergency Management Agency

۱۱ Robustness

۱۲ Integrity

۱۳ Continuity

۱۴ Ductility

۱۵ Redundancy

روش طراحی غیر مستقیم در بیشتر آیین نامه ها و استانداردهای ساختمانی آمده است اما باید توجه داشت که هدف از این الزامات بهبود عملکرد کلی سازه ها خصوصاً در برابر بارهای لرزه ای است و نه بصورت ویژه تأمین مقاومت در برابر انهدام پیشرونده. در هر صورت این روش برای طراحی در برابر انهدام پیش رونده روش دقیقی نیست و هیچ گونه الزامی در این روش برای حذف المانها و یا بارهای ویژه در نظر گرفته نمی شود.

رویکرد طراحی مستقیم صریحا مقاومت در برابر انهدام پیش رونده در حین فرآیند طراحی را در نظر می گیرد. ASCE[۱۶] دو روش برای طراحی مستقیم پیشنهاد کرده است، روش مقاومت محلی ویژه و روش مسیر بار جایگزین.

روش مقاومت محلی ویژه ملزم می کند که المانهای سازه ای بحرانی باید قادر باشند که بارهای غیر عادی را تحمل کنند. دراین روش ، مقاومت و شکل پذیری المان بحرانی در حین فرآیند طراحی تعیین می شود.

روش طراحی مسیر بار جایگزین اجازه شکست های محلی در اعضای سازه ای را می دهد اما بوسیله تأمین مسیر بار جایگزین ، به دنبال جلوگیری از شکست های بزرگ و وسیع سازه ای می باشد. هنگامی که یک عضو سازه ای دچار شکست می شود، انرژی ذخیره شده در عضو سازه ای منهدم شده آزاد شده و باعث ایجاد اضافه بار بر روی سایر اعضای سازه ای می شود. همچنین تغییر در مسیر انتقال نیرو را نیز به دنبال خواهد داشت. اگر اعضای سازه ای مجاور ظرفیت و شکل پذیری کافی برای تحمل بارهای اضافی را داشته باشند، سیستم سازه ای مسیر بار جایگزینی را برای تحمل بار تشکیل داده است. [۱]

در این روش ساختمان تحت اثر حذف یک یا چند المان سازه ای تحلیل شده و با ارزیابی ظرفیت باقی اعضای سازه ای برای جلوگیری از شکست های پی درپی، پتانسیل انهدام پیشرونده سازه بررسی می شود. امتیاز اصلی این روش این است که از عامل اولیه شکست اعضاء مستقل است و بنابراین تحلیل می تواند برای هر نوع عاملی که باعث از بین رفتن المان شود صادق باشد. قابل ذکر است که بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی انهدام پیشرونده از روش مسیر بار جایگزین استفاده کرده اند و درحال حاضر تحلیل دینامیکی غیر خطی با روش مسیر بار جایگزین و سناریوهای حذف المان مختلف، به عنوان قابل اعتمادترین روش تحلیل و ارزیابی پتانسیل انهدام پیشرونده شناخته می شود.

خرابی پیش رونده می تواند توسط روش های استاتیکی خطی دینامیکی خطی استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی تحلیل شود. هر روش دارای مزیت ها و کاستی هایی در زمان تحلیل و دقت می باشد. آیین نامه های GSA و UFC اجازه استفاده از تحلیل خطی را می دهد به این علت که رویکرد اقتصادی و عملی در گرایش های مهندسی می باشد. با این وجود رویکردهای تحلیلی غیرخطی که دقت نتایج را افزایش می دهند همواره مطلوب خواهند بود.

۶-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی:

تحلیل استاتیکی غیرخطی پرکاربردترین روش تحلیل در ارزیابی پتانسیل انهدام پیشرونده سازه‌ها و نیز ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها در تحقیقات و حتی استفاده‌های عملی می‌باشد. مطالعات کراوینکلر و سنویراتنا[۱۷] نشان داده‌اند که روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌توانند تقریب خوب را از تقاضای تغییرشکل بدست دهند، ناپیوستگی را در مقاومت تشخیص دهند و پایداری کلی سیستم سازه‌ای را ارزیابی کنند.

در تحلیل استاتیکی غیرخطی بار عمودی به صورت تدریجی افزایش داده می شود تا زمانی که بار وارد شده با ضریب دینامیکی، به مقدار نهایی خود برسد یا حالت های حدی جابه جایی چرخشی و حدود دریفت[۱۸] بر پایه معیارهای طراحی در آئین نامه به دست آید.

بعد از این که ستون بحرانی حذف شد، ضرایب دینامیکی برای شبیه سازی اثرات دینامیکی باید به دست آید. بنابراین بعد از حذف ستون بحرانی، ضریب دینامیکی با تغییر دادن بار اعمالی مطابق حالت زیر در تحلیل مربوطه اعمال می گردد:

$$\text{بار} = \alpha \times (DL + 0.25LL) \quad \text{(معادله۴)}$$

که در آن α همان ضریب دینامیکی می باشد.[۱]

جذابیت این روش سادگی آن نسبت به روش دینامیکی غیرخطی است. تحلیل با این روش نتایج با ارزشی را از رفتار سازه و شکل‌پذیری آن به دست می‌دهد. در طول انهدام پیش رونده، خصوصیات دینامیکی سازه بعد از شکست در یک و یا چند عضو، تغییر می‌کند. بنابراین برای بدست آوردن پیشروی مکانیزم انهدام توسط برنامه‌های معمول تحلیل، ممکن است نیاز باشد که چندین تحلیل استاتیکی غیرخطی پشت سرهم انجام شود.

---

۱۶ American Society of Civil Engineers

۱۷ krawinkler and Seneviratna

۱۸ Drift

برای ارزیابی انهدام پیش رونده ناشی از نیروهای لرزه‌ای، فرآیند تحلیل باید بتواند اثرات نیروهای لرزه‌ای جانبی را همزمان با اثرات نیروهای ثقلی در نظر بگیرد. این موضوع ملزم می‌کند که ابزار تحلیل بتواند پاسخ‌های سیستم سازه‌ای را از شکست‌های اولیه محلی تا انهدام و رفتار بعد از انهدام بدست آورد. فرآیندهای تحلیل انهدام پیش‌رونده جاری که تنها اثرات بارهای ثقلی را در نظر می‌گیرند قابلیت مدل سازی و بدست آوردن اثرات کامل انهدام پیش‌رونده سازه‌ها را ناشی از اضافه بارگذاری هنگام زلزله ندارند. همچنین سقوط اعضای منهدم شده که باعث بارگذاری ضربه‌ای قابل توجهی بر روی سایر اعضای سازه‌ای سیستم باقی مانده می‌شود، در بسیاری از تحلیلها در نظر گرفته نمی‌شود. لازم به ذکر است با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق باز توزیع نیروهای ناشی از حذف ستون در سازه بصورت سه بعدی و نقش تیرهای و اتصالات تیر به ستون و همچنین ستونها در این باز توزیع می‌باشد، لذا بارهای مورد نظر بارهای ثقلی می‌باشند. هرچند در صورتی که مکانیزم باز توزیع نیروها به درستی مشخص شود، فرآیند قابل تعمیم برای در نظر گرفتن سایر نیروها شامل نیروهای لرزه‌ای و اثرات آوار نیز می‌باشد. .[۱۷]

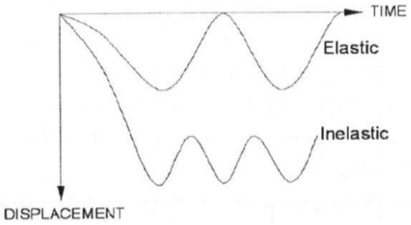
تحلیل استاتیکی غیرخطی برای ارزیابی پتانسیل انهدام پیش‌رونده براساس دو نوع فرآیند مختلف قابل انجام است. بعضی از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی[19] براساس اعمال ضریب تشدید دینامیکی و بعضی دیگر از آنها بر اساس ارزیابی انرژی نیروهای داخلی و خارجی انجام می‌شوند که در ادامه به صورت خلاصه آورده می‌شوند.

در دسته اول دستورالعمل‌های طراحی برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی ضریب تشدید ۲ برای اعمال به بارهای مرده و زنده در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که در آخرین ویرایش از دستورالعمل UFC ضریب مربوطه برای اعضا بسته به کنترل نیرویی و کنترل تغییر شکلی متفاوت می‌باشد. تحقیقات زیادی جهت بررسی دقت این ضریب در اعمال اثرات دینامیکی انجام شده است که نتیجه بیش تر این تحقیقات نشان دهنده زیاد بودن این ضریب می‌باشد.

در دسته دوم بعضی از فرآیندهای تحلیل استاتیکی غیرخطی براساس معیاری هستند که تخمینی از وضعیت تغییر مکان در زمان انرژی جنبشی معادل صفر در حین فرآیند دینامیکی را بدست دهند. به عبارت دیگر در حین فرآیند انهدام دینامیکی در زمانی که انرژی جنبشی صفر می‌شود، حالت تغییر مکان تعیین یا تخمین زده می‌شود. نمونه چنین فرآیندهایی در تحقیقات ولاسیس، ایزودین، کفیر[20] و ... مشاهده می‌شود. این تحلیل‌ها مشابه تحلیل سیستم یک درجه آزادی معادل تحقیقات ساسانی[21] نیز می‌باشند. فرآیند تحلیل بدین صورت است که ابتدا مدل تحلیلی که قسمتی از سازه اصلی درگیر حادثه است انتخاب شده و تحلیل پوش‌اوِن برای بدست آوردن منحنی بار تغییر مکان انجام می‌شود. بار متناظر است با بارهای ثقلی اعمال شده به مدل انتخاب شده و تغییر مکان نیز، تغییر مکان گره بالای ستون حذف شده می‌باشد. برای بدست آوردن منحنی بار- تغییر مکان، الگوی بارگذاری شامل افزایش تدریجی بارهای مرده و زنده بر روی مدل سازه است که در آن عضو شکست خورده اولیه حذف و بارگذاری از حالت تغییر شکل نیافته شروع می‌شود. این منحنی به عنوان پاسخ سیستم یک درجه آزادی معادل استفاده شده و در نظر گرفتن انرژی منجر به تخمین از حالت تغییر مکانها در زمان انرژی جنبشی صفر در حین فرآیند دینامیکی می‌شود.[۱]

۶-۲- تحلیل دینامیکی خطی:

در این قسمت الگوریتم مرحله به مرحله برای انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی بر اساس آئین نامه مجددا تکرار شده و این کار آنقدر ادامه می‌یابد تا یا سیستم به بار نهایی برسد و یا معیار حدود آسیب نقض گردد.تغییرشکل های دینامیکی در شکل ۳ برای تحلیل های دینامیکی خطی و تحلیل های دینامیکی غیرخطی مقایسه شده است. باید گام های زمانی مناسب برای به دست آوردن نتایج منطقی استفاده شود. انتخاب مناسب گام زمانی در تحلیل دینامیکی خطی بسیار بحرانی است به این علت که انتخاب گام زمانی بزرگ باعث ایجاد مشکل در رسیدن به همگرایی می گردد و نتایج ممکن است غیرمنطقی باشند. . برای سازه‌هایی که متحمل تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ می‌شوند، تحلیل دینامیکی خطی ممکن است پارامترهای دینامیکی غیرواقعی را بدست دهد. .[۱]



[19] pushdown

[20] Kfir, Izzoddin, vlassis

[21] Sasani

شکل ۳. پاسخ دینامیکی قاب در اثر خرابی پیش رونده

۶-۳- تحلیل دینامیکی غیرخطی:

تحلیل دینامیکی غیرخطی، با جزئیات‌ترین و کامل‌ترین روش برای تحلیل انهدام پیش‌رونده می‌باشد. این روش طبیعت دینامیکی و رفتار غیرخطی پدیده انهدام پیش‌رونده را در نظر می‌گیرد. انهدام پیش‌رونده بطور ذاتی یک رویداد دینامیکی است. اثرات دینامیکی در حین انهدام از منابع مختلفی ناشی می‌شوند. بعد از شکست یک عضو سازه‌ای، نیروهای آن به سایر اعضا منتقل می‌شود و سازه به دنبال رسیدن به یک موقعیت تعادل جدید است. باز توزیع دینامیکی نیروها تحت تأثیر اینرسی، میرایی و ارتعاشات اعضای ساختمان می‌باشد. همچنین آزاد شدن ناگهانی نیروهای هر المان منهدم شده منبع دیگری از اثرات دینامیکی است. همچنین انهدام پیش‌رونده به طور کلی با رخدادهای دینامیکی مانند انفجار، برخورد، زلزله و شکست ناگهانی المانهای سازه‌ای مانند اتصالات آغاز می‌شود. بنابراین اثرات دینامیکی در تحلیل انهدام پیش‌رونده باید در نظر گرفته شود. عملکرد سازه‌ها تحت اثر بارهای غیرعادی تنها به مشخصات هندسی وابسته نیست بلکه به مصالحی که سازه از آن ساخته می‌شود نیز بستگی زیادی دارد. همچنین همانطور که ذکر شد سازه‌ای که متحمل شکست در یک یا چند عضو شده است متحمل تغییر شکلهای زیادی می‌شود. بنابراین در نظر گرفتن غیرخطی مصالح در تحلیل انهدام پیش‌رونده نتایج بسیار بهتری را نتیجه می‌دهد. .[۱۴]
قابلیت اطمینان و دقت نتایج تحلیل خرابی پیش رونده بستگی به انتخاب پارامترهای ورودی در برنامه استفاده شده دارد. بنابراین گام های زمانی کوچک نیازمند زمان و هزینه قابل ملاحظه ای می باشد. ستون بحرانی به صورت دینامیکی حذف می شود و بارها بدون هرگونه ضریب افزایش اعمال می شوند تا زمانی که تعادل انرژی یا حالت های بحرانی بر پایه معیارهای پذیرش به دست آید. غیرخطی بودن مواد و هندسه بر روی هر گام زمانی کنترل می شود. تغییرات در خصوصیات مواد و سختی عضو در هر گام زمانی در نظر گرفته می شود. بیش تر گام های ورودی برای رویه تحلیل مشابه تحلیل دینامیکی خطی می باشد. تنها تفاوت این است که غیرخطی بودن سازه باید در هر گام زمانی برای به دست آوردن نتایج دقیق تر کنترل گردد.
ظرفیت سازه برای بازتوزیع نیروها و مقابله با تقاضای نیرو و تغییرشکل بعد از حذف ستون، می تواند با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گیرد. دقیق ترین روش برای بررسی خرابی پیش رونده استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی است. در این مقاله نیز برای بررسی فرآیند خرابی پیش رونده از تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شده است و نتایج آن با تحلیل استاتیکی غیرخطی مقایسه شده است. .[۱]

۷- فرضیات اولیه تحلیل:

در جهت رفع کاستی‌های موجود تحلیل انهدام پیشرونده ساختمانهای بتن مسلح، مدلی برای در نظر گرفتن رفتار غیرالاستیک اتصال تیر به ستون و باز توزیع نیروها در تحلیل انهدام پیش رونده ارائه شده که اصول زیر در آن در نظر گرفته شده است:

- اثرات زوال سختی
- مکانیزم هایی شامل شکست برشی و کشش میلگرد (بیرون کشیدگی میلگرد وقتی تیرها به کشش میافتند بعد از خورد شدگی در بتن)
- اثرات دالها در سختی و مقاومت در نظر گرفته می شود.
- اثرات نرخ کرنش در این مطالعه در نظر گرفته نمی شود.
- جداشدگی المان ها ناشی از شکست در این شبیه سازی لحاظ نگردیده است.
- ضربه المانهای منهدم شده و اثرات آوار در تحلیل در نظر گرفته نمی‌شود.
- تحلیل و کالیبره کردن مدل اتصال در جزء قاب با روش تحلیل پوش دان[۲۲]، مشابه آزمایشهای موجود یو و تن[۲۳] [۵] انجام می‌شود تا امکان کالیبره کردن آن وجود داشته باشد.
- تحلیل ساختمانها در مدل کلی با آنالیز استاتیکی و دینامیکی انجام خواهد شد.

۸- خلاصه تحلیل :

مطالعه در جداول ۱ و ۲ خلاصه شده است که سهم مشارکت هر یک از ستون ها و تغییرمکان آن ها را نشان می دهد. نتایج روندهای تحلیل استاتیکی و دینامیکی بررسی و مقایسه شده اند. از تحلیل ها مشاهدات زیر بدست آمده است :
اتصالات تیر، ستون در ساختمانهای بتن مسلح نقش بسیار زیادی در مقاومت در برابر بارهای وارده و باز توزیع آنها دارند. مقاومت و شکل‌پذیری این اتصالات بصورت مستقیم، مقاومت و شکل‌پذیری سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تغییر شکلهای زیاد ناشی

---

۲۲ Push Down Analysis

۲۳ Yu, J., Tan, K. H., "Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages"

از حذف ستون، در صورتی که اتصالات مقاومت و شکل‌پذیری مناسبی نداشته باشند، افت ناگهانی در ظرفیت باربری سازه به دلیل شکست ترد در اتصال رخ خواهد داد.

جدول ۱. سهم مشارکت ستون ها در بازتوزیع بار بعد از حذف ستون A2

ستون کناری دور	ستون کناری غیر متصل	ستون کناری متصل		
زیر ۰/۵	زیر ۲	۳۶/۹		ستون گوشه
زیر ۰/۵	زیر ۲	۳۸	۲۶	ستون کناری
زیر ۰/۵	زیر ۲	۱۵		ستون میانی

با ارزیابی پاسخ دو سازه ۵ طبقه بتن آرمه با ۷ سناریوی حذف ستون مجزا این نتیجه گرفته می شود که افزایش بار محوری ستون های قاب کناری ساختمان در حالت حذف ستون کناری، همواره بیش تر از ستون قاب داخلی آن می باشد. چون ستون های قاب های کناری ساختمان بیش تر در معرض حذف قرار دارند و درصد افزایش بار محوری ستون های مجاور ستون حذف شده در همان قاب بیش ترین مقدار را دارد، در طراحی اولیه سازه سهم بالاتری از مقاومت سازه به قاب های کناری اختصاص داده می شود تا ستون های این قاب ها بزرگ تر شوند. با این روش، سازه پاسخ مناسبی در حالت حذف ستون کناری نشان خواهد داد. در حالتی که یک ستون کناری حذف شود، قابی که ستون مذکور در داخل (و نه در انتها) آن قرار دارد بیش ترین نقش را بازتوزیع نیروها بر عهده خواهد داشت. هم چنین چنان چه یک ستون گوشه حذف گردد، دو ستون مجاور آن در قاب هایی که ستون محذوف جزیی از آن هاست، سهمی برابر در بازتوزیع بارها داشته و تعداد دهانه قاب های جهت طولی و عرضی در این امر بی تاثیر است. ضمنا با حذف ستون مجاور با یک ستون گوشه، افزایش شدیدی در نیروی محوری آن رخ خواهد داد. هم چنین اجزای واقع در دهانه های غیرمتصل به ستون محذوف به ندرت وارد محدوده غیرخطی می شوند و بنابراین مناطقی از سازه که از نواحی در معرض خطر دور هستند، همواره در محدوده خطی باقی می مانند.

با حذف ستون گوشه تغییرمکان نهایی سازه ها بیش تر از حالات حذف ستون های کناری و میانی است. ستون های گوشه سازه سهم کمتری از بارهای ثقلی دارند و مقاطع طراحی ضعیف تری دارند پس با حذف ستون گوشه روند غیرخطی شدن امتدادشان در طبقات بالا به صورت گسترده تری رخ داده است و بعضی مواقع گسیختگی مدل از اینجا شروع می شود. این موضوع ضعف نسبی مقاطع ستون های گوشه نسبت به تیرهای حوالی آن ها را نشان می دهد. اگرچه در تمامی حالات مورد بررسی، منحنی اولیه سازه پس از حذف ستون در طبقات پایین تر بیش از حالتی است که ستون مذکور در طبقه بالاتری حذف شود و هم چنین الگوی درصد اضافه بار قابل تحمل سیستم در کلیه آنالیزها مشابه است، اما حالت حذف ستون گوشه با سایر حالات تفاوت های چشمگیری دارد. اولا این که حد تغییرمکان نهایی سازه در طبقات مختلف همسان نبوده و در طبقات بالا بسیار بیش تر است، ثانیا این تغییرمکان ها جز در مورد حذف ستون طبقه پنجم، در مدل های اصلاح شده نسبت به مدل اولیه کاهش پیدا می کند، ثالثا تغییرمکان نظیر پلاستیک شدن در طبقات پایین تر لزوما بیش تر از طبقات بالایی نیست و رابعا درصد اضافه بار قابل تحمل سیستم قبل از گسیختگی در مدل اصلاح شده طبقه پنجم در آن به میزان قابل ملاحظه ای از حالات متناظر بیش تر است.

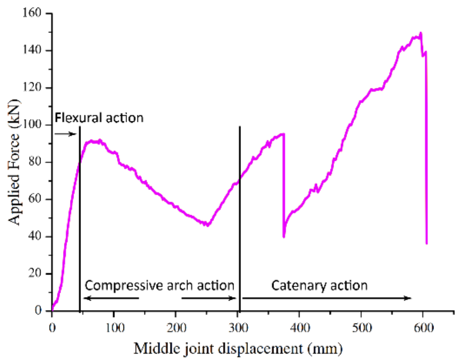
با توجه به این که در سازه مورد مطالعه این مقاله بعد از حذف ستون عملکرد قابی ویریندیل مکانیزم غالب مقاومت در برابر خرابی پیش رونده است لذا هیچ یک از مدل ها دچار خرابی کلی نمی گردد و سازه طراحی شده تحت سناریوی ایجاد آسیب اولیه در اثر حذف ستون گوشه و کناری نزدیک به وسط دهانه طبقه بالا در برابر انهدام حساس می باشد. .[۱۲]

جدول ۲. تغییرمکان بالای هر ستون بعد از حذف ستون A2

نام ستون	مقدار تغییر مکان (cm)	درصد اختلاف تغییر مکان نسبت به حالت بحرانی
C1	۴/۳۱	۱۷/۲۷
A1	۵/۲۱	حالت بحرانی
C2	۴/۱۲	۲۰/۹۲
G1	۴/۳۵	۱۷/۴۶
E1	۵/۲۷	حالت بحرانی
G2	۴/۱۶	۲۱/۰۶

۹- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر انهدام ستون های کنج، کناری و ستون های میانی بررسی گردیده و علاوه بر مقایسه جامع نتایج آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی، اصلاحات لازم جهت نیل به طرح مقاوم نیز ارائه شده است. هدف از این مقاله بررسی پتانسیل انهدام پیش رونده ساختمانهای بتن مسلح بوسیله تحلیل سه بعدی و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی اتصالات می‌باشد. بنابراین ابتدا مدل اتصال مناسب برای تحلیل انهدام پیشرونده به نحوی توسعه می‌یابد که ضمن در نظر گرفتن رفتار غیرالاستیک، قابلیت استفاده در مدلهای سه بعدی را داشته باشد. پارامترهای مؤثر بر رفتار غیرالاستیک اتصال تیر ستون بررسی شده و در مدل اتصال در نظر گرفته می شود. مدل اتصال جز قاب ارائه شده در نرم‌افزار SAP2000 بکار رفته و رفتار ساختمانهای بتن مسلح و جزء قاب آزمایش شده با نتایج این مدل تحلیلی مقایسه خواهد شد. مقایسه نتایج مدل تحلیلی با آزمایشهای تجربی در کالیبره کردن مدل قابل استفاده می‌باشد. از مدل تحلیلی ارائه شده می‌توان برای ارزیابی پتانسیل انهدام پیشرونده سازه‌های بتن مسلح طراحی شده مطابق آیین‌نامه‌های داخل و خارجی و همچنین ارزیابی روشهای تحلیل دستورالعمل‌های انهدام پیشرونده استفاده کرد.
بررسی نقش ستونهای بالای ستون حذف شده در باز توزیع نیروها و انتقال آن به قاب های طبقات اطراف از دیگر اهداف مقاله می‌باشد. سرعت زیاد انتقال موج محوری باعث می‌شود که تیرهای طبقات بالاتر همزمان با تیر بالای ستون حذف شده تغییر شکل داده و در نتیجه این تیرها نیز درباز توزیع نیروهای ناشی از حذف ستون و کاهش آسیب مؤثر می‌باشند. چنین ارزیابی از پتانسیل انهدام پیش رونده نیاز به مدل تحلیلی دارد که رفتار غیر الاستیک اعضا و اتصالات را بخوبی نشان دهد که در این مقاله سعی بر ارائه چنین مدلی ابتدا در سطح اجزا و سپس در سطح سیستم قاب می‌شود.
در این راستا ابتدا رفتار تیرهای دو دهانه و جزء قابهای آزمایش شده بررسی شده و پارامترهای مؤثر بر پاسخ تعیین می گردد. سپس با توجه به محدودیت مدلهای محاسباتی ارائه شده برای اجزای سازه‌ای بتن مسلح خصوصاً تیرها و اتصالات به بررسی مدلهای موجود و تلاش برای توسعه این مدلها پرداخته می شود. در ارائه مدل اتصالات و همچنین مدل تیر بتن آرمه، مدهای شکست مختلف این اجزا در انهدام پیشرونده مورد توجه قرار گرفته و تلاش بر این است که عوامل مؤثر بر ارائه رفتار این اجزاء در تغییر شکلهای زیاد بصورت مناسبی در مدل محاسباتی وارد شوند. همچنین بررسی نتایج با روش های تحلیل ارائه شده در آیین نامه‌ها و دستورالعمل های طراحی در برابر انهدام پیش رونده اطلاعات ارزشمندی را در خصوص دقت روش های آیین‌نامه‌ای و نحوه اصلاح آنها در اختیار خواهد گذاشت. بررسی رفتار ساختمانهای بتن مسلح طراحی شده مطابق آیین‌نامه‌های داخلی در شرایط انهدام پیش رونده و پتانسیل انهدام آنها گام انتهایی مقاله می‌باشد.
رفتار تیرهای بتن مسلح تحت تغییر شکلهای ناشی از حذف ستون به سه مرحله تقسیم شده است . مراحل سه‌گانه مکانیزم انتقال بار عبارتند از مرحله عمل قوسی، مرحله تشکیل مفاصل پلاستیک و مرحله عمل زنجیری که با استفاده از روند کار مقاله یو و تن[۵] سازه مورد بررسی را در نرم افزار SAP2000 مدل سازی، تحلیل و طراحی نموده سپس منحنی نیرو-جا به جایی اتصال میانی مطابق با شکل ۴ ترسیم شده است و در آن محدوده سه مرحله به وضوح نشان داده شده است.



شکل ۴. منحنی نیرو-جا به جایی اتصال میانی(نمونه کالیبره شده جز قاب)

حذف ستون منجر به افزایش دوبرابری دهانه تیر و همچنین افزایش ناگهانی ممان خمشی در وسط دهانه و تکیه‌گاهها می‌شود. چنین افزایش ناگهانی در ممان خمشی، ترک خوردن بتن تیر، جاری شدن میلگردهای آن در کشش و نهایتاً افزایش طول تیر را به دنبال خواهد داشت. افزایش طول تیر بوسیله سیستم سقف شامل سایر تیرها و دال و همچنین قابها محدود می‌شود. نتیجه آن گسترش نیروی فشاری محوری قابل توجهی در تیرهایی است که در معرض تغییر شکل زیاد هستند. نیروی محوری فشاری باعث افزایش ظرفیت ممان خمشی تیر شده و متناظراً مقاومت سازه در برابر انهدام پیشرونده به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. این ویژگی افزایش طول تیر و تشکیل نیروی محوری فشاری منحصر به تیرهای بتن مسلح می‌باشد و در سازه‌های فولادی چنین ویژگی مشاهده نمی‌شود. در طول این مرحله تنشهای فشاری در بالای ناحیه اتصال میانی و پایین نواحی اتصال خارجی افزایش می‌یابند. عمق ترکها در نواحی کششی نیز با افزایش تنش و کرنش در میلگردها افزایش یافته و محور خنثی مقطع جابجا می‌شود.

همراه با افزایش جابجایی در این مرحله، نیروی مقاوم نیز افزایش می‌یابد تا اینکه افت این نیرو آغاز شده و مرحله تشکیل مفاصل پلاستیک آغاز می‌شود. افت نیروی قابل تحمل تیر در انتهای این مرحله بسته به جزئیات تیر و اتصال آن به ستون بصورت ناگهانی و یا تدریجی می‌باشد. در اتصالات غیرلرزه‌ای افت ناگهانی ناشی از بیرون کشیدگی میلگرد و خرد شدن بتن اتفاق می‌افتد و در اتصالات لرزه‌ای افت تدریجی ناشی از جاری شدن میلگردها و خردشدگی بتن و تشکیل عمل زنجیری اتفاق می‌افتد.
در طول مرحله تشکیل مفاصل پلاستیک جاری شدن میلگردها و افزایش تنش در بتن نواحی فشاری ادامه خواهد داشت تا خردشدگی بتن روی دهد. در طول ناحیه پلاستیک افزایش کرنش میلگردها منجر به گسترش عمق ترکها و جابجایی زیاد عمق محور خنثی می‌شود. در نتیجه نرخ ازدیاد طول مرکز تیر بنا به غیرخطی هندسی بر نرخ ازدیاد طول بنا به تغییر شکل خمشی غالب شده و بنابراین نیروی محوری تیر شروع به افت می‌کند. این پدیده کاهش ظرفیت باربری تیری را به دنبال خواهد داشت.
مرحله تشکیل عمل زنجیری بوسیله شاخه افزایشی دوم در منحنی نیرو- تغییر مکان مشخص می‌شود. گسترش ترکها در عمق تیر منجر به کاهش تنشها در میلگردهای فشاری مقطع شده و به صورت ناگهانی تنش فشاری به کششی تبدیل می‌شود. ستونهای کناری که قبلاً تحت اثر نیروی فشاری به سمت بیرون هول داده می‌شدند اکنون به داخل کشیده می‌شوند. در این مرحله انتقال نیرو عمدتاً از طریق میلگردها بدست می‌آید و بنابراین مشارکت بتن می‌تواند در نظر گرفته نشود.
در مراحل اولیه تغییر شکل، هنگامی که سهم مشارکتی بتن حاکم بر میزان باربری تیری می‌باشد، نیروها از طریق عمل قوسی منتقل می‌شوند. با تشکیل ترکها در نواحی کششی و خردشدگی بتن در نواحی فشاری، میلگردهای تیر در توزیع و انتقال بارها نقش اصلی را ایفا می‌کنند.
اتصالات گیردار در ساختمانهای بتن مسلح نقش اصلی را در شکل گیری مکانیزم‌های باز توزیع و انتقال نیرو دارند. با حذف ستون و تغییرشکل تیر بالای ستون حذف شده، تیرها و ستون‌های طبقات بالاتر نیز تغییر شکل می‌دهند. اتصالات گیردار باعث می‌شوند که تیرها و ستونهای بالای محل حذف ستون بصورت انحنای مضاعف تغییر شکل دهند. چنین تغییرشکلی باعث ایجاد نیروی برشی در تیرها و در نتیجه باز توزیع نیروها توسط آنها می‌شود. این عمل به عنوان عمل ویرندیل شناخته می‌شود. به عبارت دیگر عمل ویرندیل تغییر مکان نسبی انتهای تیرهای با اتصالات گیردار و در نتیجه ایجاد نیروی برشی در این تیرها است که نتیجه آن باز توزیع نیروها می‌باشد. با حذف ستون، تیرهای طبقات بالاتر تقریباً همزمان با تیر بالای ستون حذف شده به سمت پایین تغییر شکل می‌دهند. این موضوع به دلیل سرعت انتقال موج محوری در ستون‌های بالای ستون حذف شده به نسبت سرعت انتقال موج خمشی می باشد.

منابع و مراجع

[۱] U.S. Department of Defense, "Design of building to resist progressive collapse, UFC 4-023-03, Unified Facility Criteria", Washington D.C., June 2013.

[۲] General Services Administration, "Alternative Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance", GSA, October 2013.

[۳] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Pre-standard commentary for seismic rehabilitation of buildings", Washington, D.C.

[٤] American Society of Civil Engineers, "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE/SEI41-06", Reston, Virginia, USA, 2007.

[٥] Yu, J., Tan, K. H., "Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages", Journal of Engineering Structures, Volume 55, Pages 90-106, May 2013.

[٦] Interagency Security Committee, "Security Design Criteria For Federal Facilities", ISC, April 2010.

[۷] National Institute of Standard and Technology (NIST), "Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Building, NISTIR 7396", US Department of Commerce, February 2007.

[۸] Osama, A.M, "Assessment of Progressive Collapse Potential in Corner Floor Panels of Reinforced Concrete Buildings", Engineering Structures, Volume 31, Issue 3, Pages 749-757, March 2009.

[۹] Talaat, M., Khalid, M. M., "Modeling Progressive Collapse in Reinforced Concrete Building Using Direct Element Removal", University of California, Berkley, 2009.

[۱۰] Sasani, M., Kropelnicki, J., "Progressive Collapse Analysis of RC Structures", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 17, Pages 757-771, 2007.

[۱۱] Applied Technology Council (ATC), "Seismic Performance Assessment of Buildings, ATC-58", Redwood City, CA, 2011.

[۱۲] Kunnath, K., Yi, W.J, He, Q.F, Xiao, Y., "Experimental Study on Progressive Collapse-Resistant Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures", ACI Structural Journal, 105(141), 2010.

[۱۳] ACI-318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and commentary, ACI 318-14", Detroit (MI), 2011.

[۱٤] Marjanishvili, S., Agnew, E., “Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis”, Journal of Performance of Constructed Facilities, Volume 20, Issue 4, Pages 365-374, Nov. 2006.

[۱۵] Bazan, M.L., “Response of reinforced concrete elements and structures following loss of load bearing elements”, Ph.D. Thesis, Northeastern University, January 2008.

[۱۶] Huynh, C.T., Park, J., Kim, J., Choi, H., “Progressive Collapse Resisting Capacity of Reinforced Concrete Beam-Columns Sub-Structures”, Magazine of Concrete Research, Volume 63, Issue 4, Pages 297-310, 2012.

[۱۷] Pachenari, A., Keramati, A., Pachenari, Z., “Investigation of Progressive Collapse in intermediate Reinforced Concrete Frame Structures”, The Structural Design of Tall and Special Buildings Journal, 2010.

[۱۸] Marjanishvili, S., “Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse”, Journal of Performance of Constructed Facilities, Volume 18, Issue 2, Pages 279-285, May 2004.

[۱۹] Krawimkler, H., Seneviratba, G., “Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation”, Engineering Structures, Volume 20, Issue 4, Pages 452-464, 1998.

[۲۰] Whittaker, A., Hamburger, R., Mahoney, M., “Performance-Based Engineering of Buildings for Extreme Events”, http://www.AISC.org

[۲۱] Merter, O., Ucar, T., “A Comparative Study on Nonlinear Static and Dynamic Analysis of RC Frame Structures”, Journal of Civil Engineering and Science, Volume 2, Issue 3, Pages 155-162, 2013.