

ارزیابی رفتار سازه های بتن آرمه تحت اثر حذف ستون

سارا دانشور^۱، میلاد کلبه داری^۲

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

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

چکیده:

اصطلاح انهدام پیش رونده عمدتاً برای توضیح نحوه گسترش زنجیره وار خرابی موضعی برخی اعضا به بقیه سازه به کار برده می شود. پس از انهدام برج های تجارت جهانی، با توجه به اینکه بروز این پدیده به جامعه خسارات مالی و جانی قابل توجهی وارد می کند، علاقه روز افزونی در سازندگان و دولت‌ها برای ارزیابی پتانسیل انهدام پیش رونده در ساختمان‌های موجود و طراحی مقاوم در برابر انهدام پیش رونده در ساختمان های جدید ایجاد شد. در این پژوهش ابتدا یک ساختمان بتن آرمه قاب خمشی مشابه سازه های متداول شهری ایران طراحی می شود و سپس پتانسیل انهدام پیش رونده ساختمان‌های بتن مسلح به وسیله روش های تحلیل سه بعدی با چهار روند تحلیل استاتیکی الاستیک خطی، استاتیکی غیرخطی، دینامیکی الاستیک خطی و دینامیکی غیرخطی برای ارزیابی خطر انهدام پیش رونده مطابق این نامه بررسی می شود و در مورد مزایا و معایب هر یک از این روشها بحث می کنیم و به این نتیجه می رسیم که مؤثرترین روند تحلیل برای ارزیابی انهدام پیش رونده دارای مزایای همگی این چهار روش می باشد که با استفاده سیستماتیک از این ترکیب نتایج، روشهای تحلیلی در حالت هایی که احتمال انهدام پیش رونده بالا می باشد، بدست می آید. در روش تحلیلی اثر جانمایی ستون حذف شده بررسی می شود و با بررسی نتایج تحلیل ها احتمال بیش تر ایجاد انهدام پیش رونده در اثر حذف یک ستون در طبقه بالا به نسبت حذف ستون در طبقه پایینتر، به دلیل نبود امکان ایجاد عملکرد قابی ویریندیل بعد از حذف ستون طبقه بالا، نشان داده می شود. در ساختمان پنج طبقه مورد مطالعه چهار روش تحلیل مقایسه شده و در صورت نیاز به تقویت، مقاطع تیرها اصلاح شده است. بررسی نقش ستونهای اطراف ستون حذف شده در باز توزیع نیروها و انتقال آن به قابهای طبقات بالا از دیگر اهداف تحقیق می باشد.

واژه های کلیدی:

انهدام پیش رونده، مطالعه مقایسه ای، سازه بتن آرمه قاب خمشی، آنالیز غیرخطی، حذف ستون در طبقات، باز توزیع نیرو، جانمایی ستون حذف شده، تحلیل دینامیکی

مقدمه:

انهدام پیش رونده^۱ زمانی اتفاق می افتد که یک آسیب نسبتاً محلی مسبب زنجیره ای از شکست های المان های سازه ای، نامتناسب با آسیب اولیه شود که منجر به خرابی قسمتی یا کلی سازه می گردد. خرابی محلی آغازگر انهدام پیش رونده، خرابی اولیه نامیده می شود. از آنجا که انهدام پیش رونده موجب لرزش المان های ساختمان می شود حادثه ای دینامیکی می باشد و منجر به ایجاد نیروهای داخلی دینامیکی، همچون نیروهای اینرسی می شود و سازه ممکن است انرژی این نیرو را جذب کند. 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 نیروهای داخلی را از بین می برد و سازه تا زمان انهدام یا پیدا شدن جایگاه تعادل جدید، دچار ارتعاش می شود. انهدام پیش رونده ذاتاً اتفاقی غیرخطی است که در آن المان های سازه ای بیش تر از محدوده الاستیکی خود تحت تنش قرار می گیرند.

از دیدگاه تحلیلی، انهدام پیش رونده زمانی حادث می شود که یک تغییر ناگهانی محلی در هندسه سازه منجر به نیروهای داخلی دینامیکی می شود که بیش تر از ظرفیت تحمل المان های مجاور آن است و منجر به شکست آن ها می گردد که در نتیجه آن نیروهای داخلی دینامیکی اضافه، تا جایی که سازه باقی مانده دارای تعادل شود (انرژی لرزش را جذب کند) انتقال پیدا می نمایند. در کل، انهدام پیش رونده ظرف چند ثانیه اتفاق می افتد.

بارگذاری در انهدام پیش رونده به دو گونه می باشد: باری که باعث شکست المان سازه ای می شود (بار اولیه) و بارهایی که در اثر حرکات سازه ای پیرو انهدام ناگهانی المان (بارهای ثانویه). بارهای خارجی غیرعادی همچون فشار انفجار پیرو حملات انفجاری ممکن است بارهای اولیه را ایجاد کنند، در حالی که بارهای ثانویه از بارهای استاتیکی و دینامیکی داخلی ایجاد می شوند و توسط تغییرات ناگهانی در مسیر بار از طریق هندسه سازه ایجاد می شوند. این مقاله بررسی آثار بارهای ثانویه را مورد دقت خود قرار می دهد.

بهترین راه کاهش اثر انهدام پیش رونده جلوگیری از اتفاق است. هرچند جلوگیری کامل یعنی کاهش احتمال وقوع به صفر همیشه امکان پذیر نیست. لذا به عنوان راه جایگزین با طراحی مناسب سازه می توان احتمال انهدام پیش رونده را از طریق توجه به جزئیات سازه ای و مشخصات مصالح کاهش داد. تحلیل انهدام پیش رونده برای ارزیابی احتمال گسترش آسیب اولیه به سازه که منجر به شکست بزرگ سازه ای و منجر به مرگ و میر می شود به کار برده می شود.

سازندگان ساختمان ها و نهاد های دولتی به طور روز افزونی علاقه مند به تخمین پتانسیل انهدام پیش رونده ساختمان های موجود و جلوگیری از انهدام پیش رونده در طراحی سازه های جدید هستند. هرچند بعد از انهدام ساختمان رونان پوینت^۲ در سال ۱۹۶۸ در بریتانیا مطالبی در ارتباط با انهدام پیش رونده منتشر شد اما تحقیقات کمی بعد از اواسط دهه ۷۰ انجام شدند. ASCE [۱] خلاصه ای از مفاهیم انهدام پیش رونده و جلوگیری از آن را در این بازه تهیه کرد و بعداً آن را به روز رسانی نمود. گزارش های تهیه شده توسط FEMA [۲] نیز در انجام تحلیل انهدام پیش رونده دارای اهمیت بالایی هستند. با وجود این که گزارش های FEMA مستقیماً تحلیل انهدام پیش رونده را بررسی نکرده اند، حاوی روش هایی می باشند که می توان به انهدام پیش رونده نسبت داد. بعد از بمب گذاری و انهدام بخشی از ساختمان فدرال آلفرد موراه^۳ در سال ۱۹۹۵، دستوری از طرف دولت فدرال مبنی بر تهیه استاندارد ساخت برای ساختمان های مورد تهدید حملات تروریستی داده شد. در پاسخ به این دستور، ابتدا GSA [۳] و سپس IISC [۴] در سال ۲۰۰۴ اسناد معیارها را منتشر نمودند. این اسناد مقاومت در برابر انهدام پیش رونده را در طراحی ساختمان های فدرال که جدید ساخته می شوند لازم می دانند اما در رابطه با روش آن سکوت می کنند. تحقیقات موسسه NIST [۵] نیز از سال ۲۰۰۲ اطلاعات مفیدی در اختیار مهندسان گذاشته است.

GSA از سال ۲۰۰۰ و DOD [۶] از سال ۲۰۰۲ راهنمایی برای ارزیابی انهدام پیش رونده چاپ کردند که اطلاعات کلی در رابطه با رویکرد و روش ارزیابی پتانسیل انهدام پیش رونده فراهم می کند. هرچند جزئیات کمی برای تحلیل سیستماتیک انهدام پیش رونده در اختیار مهندسان هست تا ملزومات آئین نامه ها را برآورد کنند. به علاوه هر دو آئین نامه استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی را به دلیل ملاحظات از جمله پیچیدگی آن، پیشنهاد نمی کنند. در این مقاله نشان می دهیم که تحلیل

¹Progressive Collapse

²Ronan Point

³Alfred P. Murrah Federal Building

دینامیکی غیرخطی برای انهدام پیش رونده نه تنها نتایج دقیق تری ارائه می دهد بلکه استفاده از آن نیز آسان است. به دلیل طبیعت ناگهانی انهدام پیش رونده و هزینه بالای تغییر در ساختمان برای مقاومت در برابر انهدام پیش رونده، ضروری است روش های تحلیل انهدام پیش رونده معتبر باشند. مهندسان نیازمند روش های دقیق و مختصر هستند تا نتایج قابل اعتماد را در زمانی کوتاه بدست آورند.

تحلیل انهدام پیش رونده در نرم افزارها با حذف ناگهانی یک یا چند عضو از المان های باربر و تحلیل توانایی باقی مانده سازه جهت جذب آسیب انجام می شود. برای انجام چنین تحلیلی با نرم افزارهای در دسترس، تحلیل انهدام پیش رونده با شرایط اولیه انجام می شود. در این مقاله چهار روند تحلیل متوالی که خطر انهدام پیش رونده را ارزیابی می کنند ارائه شدند: استاتیکی الاستیک خطی؛ استاتیکی غیرخطی؛ دینامیکی الاستیک خطی و دینامیکی غیرخطی. در مورد مزایا و معایب هر روش بحث می گردد و موثرترین روش تحلیل برای ارزیابی انهدام پیش رونده شامل بخش های مفید هر چهار روند نتیجه گیری می شود که با انجام سیستماتیک روندهای تحلیل جامع رو به فزونی جهت تایید احتمال بالای انهدام پیش رونده استفاده می گردد. بدین صورت از یک مند تحلیل انهدام پیش رونده جهت تحلیل انهدام پیش رونده استفاده می کنیم. با وجود اینکه چهار روش تحلیل ارائه شده در این مطالعه می توانند مستقلاً به کار برده شوند، مکمل یکدیگر هستند و بنابراین توصیه می شود که روش ترکیبی تحلیل انهدام پیش رونده استفاده شود. برای این کار ابتدا از مند ساده تر استاتیکی شروع می کنیم و پس از آن با افزایش پیچیدگی در روش تحلیل به مقدار مورد نیاز به بررسی سازه پرداخته می شود، تا جایی که احتمال انهدام پیش رونده پایین تعیین شود و یا همه روش ها و تدابیر مهندسی موجود مستهلک شوند.

هدف و سازماندهی:

هدف اصلی این مقاله فراهم کردن روند گام به گام تحلیل جامعی است که به سادگی می توان مراحل آن را دنبال کرد که بیش تر موارد به نتایج قابل اعتماد و دقیق برای تخمین احتمال انهدام پیش رونده دست میابند. رویکرد به شرح زیر است:

1. تعریف پدیده انهدام پیش رونده و تحلیل ساختمان نمونه با استفاده از چهار روش تحلیل متفاوت: استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی، دینامیکی خطی، دینامیکی غیرخطی.
2. انتخاب روند تحلیل و اعتبارسنجی نتایج با بررسی مقاله یو-تن^۴ [۷]
3. مشخص کردن مزایا و معایب و محدودیت های هر یک از چهار روند با ارزیابی و مقایسه روندهای تحلیل بر اساس تحلیل نمونه و بررسی اثر جانمایی حذف ستون بر پتانسیل مقاومت سازه در برابر انهدام پیش رونده
4. مشخص کردن روش تحلیلی که در پایان به محافظه کارانه ترین پاسخ می شود و بیش ترین منابع را احتیاج دارد.
5. نتیجه گیری و توصیه هایی برای روش تحلیل برتر بر اساس دقت و سادگی در عملکرد

موضوع های عمده ای که در این مقاله پوشش داده شده اند:

-انتخاب روش تحلیل

-راستی آزمایی نتایج بدست آمده

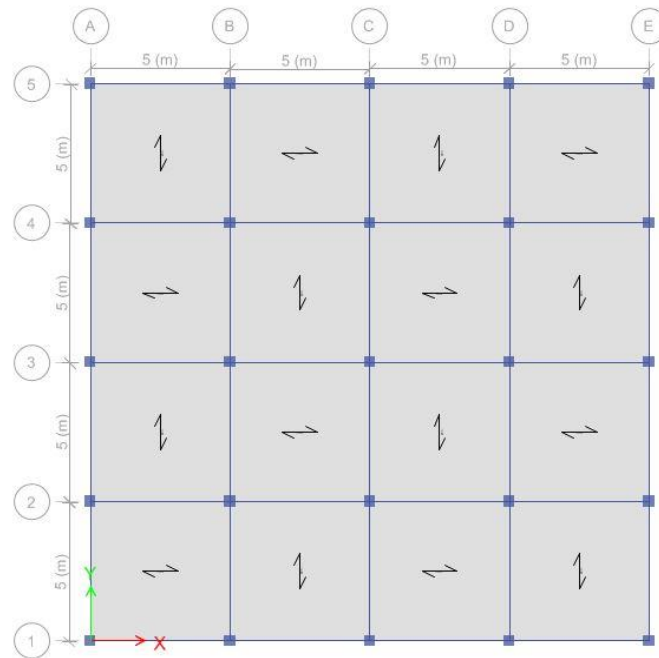
-ارزیابی نتایج

نتایج تحلیل:

هندسه ساختمان و سناریوی حذف:

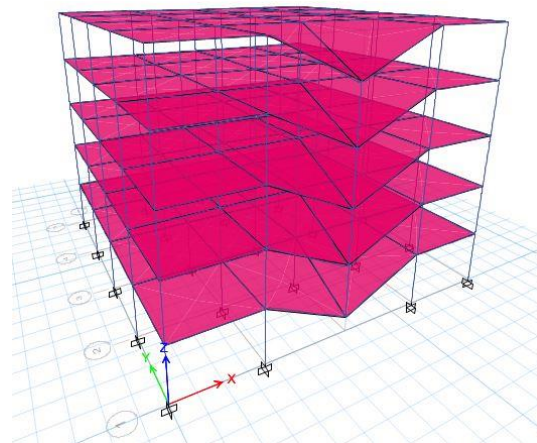
ساختمان مورد بررسی ۵ طبقه است که در شهر تهران و بر روی خاک نوع ۳ قرار دارد. این سازه دارای اسکلت بتنی با سیستم مقاوم قاب خمشی معمولی در هر دو جهت است. همچنین ارتفاع طبقات سازه برابر ۳/۲ متر، ابعاد دهانه ها ۵ متر و سقف از نوع دال دو طرفه لحاظ می گردد. شایان توجه است که در انتخاب مشخصات مذکور سعی شده است تا ویژگی های رایج ساختمان های بتنی ایران، در حد امکان تأمین گردد. پلان سازه در شکل ۱ نشان داده شده است.

^۴Yu, J., Tan, K. H., "Experimental and Numerical Investigation on Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Beam Column Sub-Assemblages"

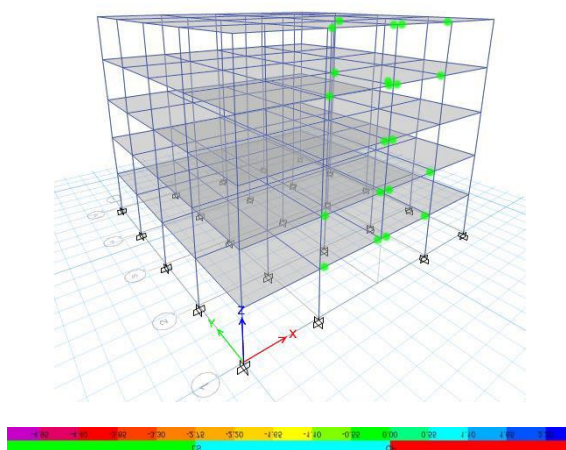


شکل ۱. پلان سازه مورد بررسی

برای تحلیل انهدام پیش رونده، آیین نامه UFC4-023-03 تعدادی سناریوی حذف را اجبار می دارد. با این حال، تنها حذف یک المان در هر بار الزامی است. تحلیل مستقل از تهدید انجام می شود، به این معنا 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 سازه مورد ارزیابی ستون های A2, B1, C1 و A3 به نمایندگی از ستون های خارجی و ستون A1 به نمایندگی از ستون های واقع در کنج ساختمان، جهت ارزیابی برگزیده شده و علاوه بر این، اثر حذف ستون های C2, C3, B2 و B3 نیز با فرض وجود پارکینگ عمومی در طبقه اول بررسی می شود. شکل ۲ مدل سه بعدی سازه نمونه را نشان می دهد و شکل ۳ مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه بر اثر حذف ستون C1 در طبقه اول را نمایش می دهد.



شکل ۲. مدل سه بعدی سازه مورد مطالعه پس از حذف ستون C1 در طبقه اول



شکل ۳. مفاصل پلاستیک تشکیل شده در حالت تحلیلی دینامیکی در مدل C1-1

با توجه به این که آئین نامۀ UFC لزوم توجه به اثر حذف ستون های کناری و کنج را در طبقات بالاتر نیز مد نظر قرار می دهد، اثر حذف ستون های A1 و A3، A2، B1، C1 در طبقات دیگر نیز کنترل گردیده و نتایج مربوط به کلیه آنالیزها در طبقات مختلف محاسبه و با هم مقایسه می شوند. شایان توجه است که در این مرحله طراحی اولیه حسب نیاز جهت ایجاد مقاومت در برابر خرابی پیش رونده اصلاح می گردد. نرم افزار مورد استفاده برای کاربرد روش مسیر جایگزین، نسخه 2015 از Etabs می باشد که مطابق اعتبارسنجی با مقاله یو-تن^۵ از لحاظ داشتن قابلیت های لازم مورد تأیید قرار گرفته است.

مشخصات مصالح و اندازه المان :

در ساختمان مورد مطالعه تکیه گاه ها گیردار و بتن مصرفی دارای مقاومت فشاری بتن $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ بوده و کلیه آرماتورهای به کار رفته در سازه از نوع A3 با مقاومت جاری شدن $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$ و مقاومت گسیختگی $f_u = 6000 \text{ kg/cm}^2$ هستند. پارامتر مدول الاستیسیته بتن و فولاد نیز به ترتیب برابر با $E_c = 2.37 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ و $E_s = 2.039 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ انتخاب می شود. مشخصات مقاطع مورد استفاده در ستون ها که در این مطالعه استفاده شده اند در جدول ۱ نشان داده شده اند.

جدول ۱. مشخصات مقاطع مورد استفاده در ستون ها

مقطع	ابعاد ستون cm × cm		آرماتور مقطع		خاموت دو انتها		خاموت میانی	
			تعداد	درصد	تعداد	فاصله (cm)	تعداد	فاصله (cm)
۱	۵۰	۵۰	16Φ22	۴۳/۲	2Φ10	۱۰	2Φ10	۲۰
۲	۵۰	۵۰	12Φ22	۸۲/۱	2Φ10	۱۰	2Φ10	۲۰
۳	۴۰	۴۰	12Φ22	۸۵/۲	2Φ10	۱۰	2Φ10	۲۰
۴	۴۰	۴۰	8Φ22	۹۰/۱	2Φ10	۱۰	2Φ10	۲۰

رفتار دینامیکی :

حذف ناگهانی یک المان در سازه باعث یک تغییر هندسی فوری در سازه می شود و منجر به آزاد شدن انرژی پتانسیل و هم چنین تغییر سریع در نیروهای دینامیکی استاتیکی داخلی می شود که شامل نیروهای اینرسی می باشد. معمولاً این انرژی با

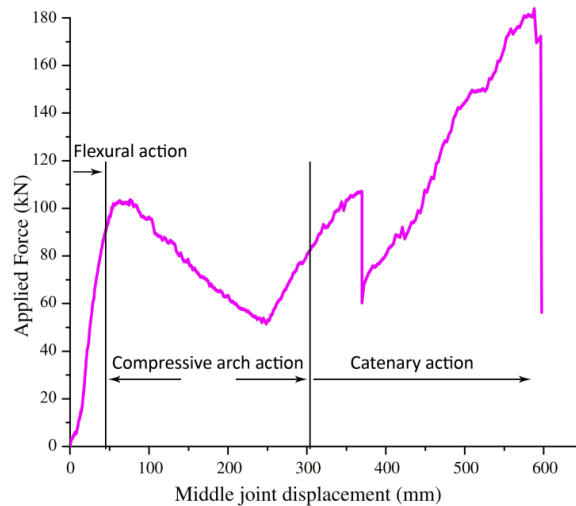
^۵Yu, J., Tan, K. H., "Experimental and Numerical Investigation on Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Beam Column Sub-Assemblages"

مجاورت سریع آسیب محدود شده است. از آنجا که این رفتار محلی است، هنگام انجام تحلیل دینامیکی باید دقت کرد؛ به خصوص، در مدهای بالای ارتعاش هنگام استفاده از برهم نهی گام به گام مستقیم بالاتر و برتر هستند، زیرا چنین الگوریتم‌هایی برای همه مدهای ارتعاش ممکن با مش‌المان محدود مربوطه و تحلیل گام زمانی آن قابل استفاده هستند.

رفتار غیرخطی :

پاسخ سازه به هر بارگذاری، از جمله بارهای دینامیکی داخلی غیرخطی است؛ بنابراین هرگاه رفتار غیرخطی عملی باشد و آئین نام‌های موجود الزامی بدانند، باید مورد توجه قرار گرفته شود. با این وجود، علی‌رغم استفاده از سخت‌افزارهای سریع امروزی ارزیابی دینامیکی غیرخطی می‌تواند بسیار وقت‌گیر می‌باشد.

پیش‌بینی می‌شود که اثر غیرخطی هندسی (به دلیل انحنای بزرگ) پاسخ کلی سازه را به دلیل توانایی گسترش نیروهای زنجیری (غشایی) قابل توجه در تیرهای با انحنای بزرگ، بهبود بخشد. با این حال احتمال اینکه انحنای بزرگ منجر به شکست در اثر شکل‌پذیری و چرخش بیش از حد قبل از اینکه نیروهای زنجیری عمل کنند، بیشتر است، چرا که تیرها در تکیه‌گاه‌های انتهایی کاملاً گیردار شده‌اند و به صورت افقی تغییر مکان می‌دهند. عملکردهای زنجیری وقتی انتهای عضو در برابر تغییر مکان‌های افقی ثابت شده‌اند قابل توجه می‌شوند. مرحله تشکیل عمل زنجیری به وسیله 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 به دست می‌آید و بنابراین مشارکت بتن می‌تواند در نظر گرفته نشود. شکل ۴ منحنی نیرو-جابجایی اتصال میانی را نشان می‌دهد که در آن محدوده عملکرد جزء قاب مشخص شده است.



شکل ۴. منحنی نیرو-جا به جایی اتصال میانی

بارها :

راه‌نمای انهدام پیش‌رونده UFC ترکیب بارهای ذیل را برای ارزیابی انهدام پیش‌رونده الزامی می‌داند:

(معادله ۱) برای روند تحلیل استاتیکی : $بار = 2 \times (DL + 0.25LL)$

(معادله ۲) برای روند تحلیل دینامیکی : $بار = DL + 0.25LL$

که در آن بار مرده DL که به صورت اتوماتیک توسط Etabs2015 بر اساس حجم‌المان و چگالی مصالح ایجاد می‌شود؛ و بار زنده LL و به اندازه 200 Kg/m^2 که یکنواخت بر مساحت همه کف‌ها من‌توزیع شده است فرض می‌شود. ضریب ۲ در معادله ۱ به عنوان ضریب بزرگنمایی دینامیکی برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی وقتی از روند تحلیل استاتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انتشار خرابی :

تحلیل دینامیکی غیرخطی با شرایط اولیه برای مدل‌سازی انتشار حقیقی (انهدام پیش رونده) با استفاده از برنامه های کامپیوتری المان محدود رایج می تواند استفاده شود و لازمه آن انجام تحلیل در چند بخش می باشد.

بخش اول تحلیل:

تحلیل انهدام پیش رونده با معرفی آسیب اولیه (مثلا حذف ستون) شروع می شود. اولین المان حذف شده در تحلیل را پیدا کنید و شرایط تنش و انحنای سازه را در زمان حذف عضو ذخیره نمایید.

بخش دوم تحلیل:

المان منهدم شده را از مدل کامپیوتری حذف کنید و با استفاده از شرایط اولیه ذخیره شده در بخش اول تحلیل، تحلیل دینامیکی انجام دهید. المان دیگری پیدا کنید که منهدم شده و شرایط تنش و انحنای سازه را در زمان انهدام المان ذخیره کنید.

بخش تحلیل متعاقب :

بخش دوم تحلیل را تکرار کنید تا زمانی که سازه به تعادل برسد (مثلا انهدام را جذب کند) یا سازه دچار انهدام کامل گردد.

تعادل سازه :

تحلیل تعادل سازه برای تعیین تعادل حرکتی سازه آسیب دیده بعد از وقوع آسیب اولیه و هم چنین بعد از اینکه مابقی سازه به تعادل رسیده، لازم است. این تحلیل از تعادل حرکتی سازه حین و بعد از حادثه اطمینان حاصل می کند.

انتخاب روند تحلیل :

چندین رویکرد برای ارزیابی پتانسیل انهدام پیش رونده وجود دارد. ساده ترین آن ها روش غیرمستقیم است که در آن تغییراتی همچون بهبود جزئیات اتصالات، ارتقاء نامعینی و شکل پذیر کردن سازه در طراحی برای افزایش مقاومت و پیوستگی کلی انجام می شوند. روش مستقیم شامل دو روش مسیر بار جایگزین و روش طراحی مستقیم است. برای روش مسیر جایگزین، حذف یک عضو اصلی سازه انرژی ذخیره شده در عضو سازه ای منهدم شده را آزاد می نماید 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. برای روش طراحی مستقیم، بارهایی که انهدام عضو سازه ای اصلی را آغاز می نمایند برای ارزیابی امکان انهدام انتخاب می شوند. روش مسیر بار جایگزین، جهت ارزیابی پتانسیل انهدام پیش رونده با حذف یک یا چند المان برابر سازه ای صورت می پذیرد (که آسیب آغازگر را معرفی می کنند) و مابقی سازه برای تعیین گسترش آسیب یا عدم گسترش آن مورد تحلیل قرار می گیرند. در این مقاله از روش مسیر بار جایگزین استفاده خواهد شد که یکی از مزایای آن می باشد که نتایج از بار آغازگر (عامل اولیه شکست اعضا) مستقل عمل می کنند، لذا این روش برای هر نوع خطری که منجر به حذف عضو شود پایدار می باشد.

در روش های تحلیلی مورد استفاده شده برای ارزیابی احتمال انهدام پیش رونده روش ساده استاتیکی الاستیک خطی دو بعدی متمایز از تحلیل پیچیده تاریخیچه زمانی غیرخطی سه بعدی است. حذف المان های باربر (آسیب آغازگر) بسته به روش مورد استفاده با یک حذف دینامیکی یا شبه استاتیکی ناگهانی مدل‌سازی می شود. در کل، یک برنامه کامپیوتری تحلیل سازه پیشرفته همچون Etabs2015 توانایی انجام تحلیل انهدام پیش رونده پیچیده را که شامل ارزیابی پاسخ همه المان های سازه ای مجاور ناحیه شکست را در بردارنده می باشد. هر چهار روش بحث شده در این مقاله با Etabs2015 صورت پذیرفته است.

تحلیل انهدام پیش رونده با استفاده از چهار روند تحلیل ذیل که به ترتیب پیچیدگی مرتب شده اند انجام می شود : استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی، دینامیکی خطی و دینامیکی غیرخطی است. همانطور که جلوتر در این مقاله، از آنجا که نتایج روندهای تحلیل متفاوت یکدیگر را کامل می کنند روند انجام محاسبات و ارزیابی نتایج نسبتا سهل شده است.

برای ساده کردن و برای شرح واضح تر مراحل تحلیل انهدام پیش رونده، فرضیات زیر را در نظر خواهیم داشت :

۱. یک ساختمان منظم با یک سناریوی حذف متقارن استفاده شده است تا از پیچیدگی های تحلیل احتمالی ناشی از عدم تقارن جلوگیری شود.
۲. تیرهای ثانویه پین به پین متصل شده اند و به مقاومت در برابر انهدام پیش رونده کمکی نمی کنند.

۳. سختی خمشی خارج از صفحه دال های کف برای اطمینان از عدم مقاومت در برابر انهدام پیش رونده، کاهش یافته است.
۴. همه قاب های محیطی قاب های ممان خمشی ویژه با اتصالات قوی تر از تیرها هستند، که به جای مفاصل پلاستیک اتصالات یا ستون ها ، مفاصل پلاستیک تیرها را تحت تاثیر قرار می دهند.
۵. آثار انحنای بزرگ در تحلیل مد نظر قرار نگرفته است.
۶. امنیت و فاکتورهای افزایش دینامیکی مصالح استفاده نمی شوند زیرا یکی از اهداف اصلی این مطالعه مقایسه دست آورد روندهای تحلیل متعدد خواهد بود.
۷. میرایی ویسکوز معادل ۵٪ در تحلیل دینامیکی فرض شده است.

زمان بیش تری برای ایجاد در مقایسه با مدل های خطی مدل های غیرخطی شدن صرف شده است. به این دلیل که مدلسازی های اضافی با ید در طرح دید تا مفاصل پلاستیک را تعریف و محل آن ها را تعیین کنیم (لطفا دقت کنید که تنها کار لازم برای تحلیل غیرخطی تعریف مفاصل پلاستیک و جایگذاری آن ها در سازه است).

روش ارجح برای تحلیل پیش رونده :

همان گونه که در ادامه اشاره خواهد شد، روش های تحلیل پیچیده تر و جامع تر نتایج دقیق تری ارائه می دهند. با این حال، برای دقت، هزینه بالاتری باید پرداخت از جمله هزینه مهندسی بسیار دقیق و منابع کامپیوتری بزرگ، که گاهی هفته ها برای گرفتن خروجی باید صبر کرد. برای همه روش ها، بزرگ ترین چالش بررسی و تایید اعتبار نتایج است. در کل، روش های پیچیده تر تحلیل نیاز به بررسی روند اعتبارسنجی جامع تری دارند که ممکن است شامل مدلسازی جایگزین و مطالعات حساسیت متعدد شود. روش های تحلیل ساده تر، معمولاً نیازمند روش های اعتبارسنجی ساده کننده هستند همچون محاسبات دستی و بازرسی چشمی شکل های تغییرشکل داده (شکست و پیچش) و دیاگرام های نیروها. بنابراین روش های تحلیل ساده تر از دید محاسباتی ترجیح داده می شوند.

یک سمت قضیه هزینه منابع مهندسی است و سوی دیگر هزینه ساخت. با وجود اینکه هزینه مهندسی در دیدگاه مدیران پروژه می تواند زیاد به نظر برسد، در حقیقت اکثراً در برابر هزینه های ساخت و در صورتی که قصد جلوگیری از انهدام پیش رونده در سازه را داشته باشیم، ارزش جان انسان، بسیار کمتر هستند. همه منابع مهندسی باید قبل از طراحی سازه مقاوم در برابر انهدام پیش رونده، با استفاده از همه روندهای تحلیل موجود باید از پا دربیایند تا جایی که بالا بودن احتمال انهدام پیش رونده اثبات شود و تغییر در حکم ایجاد شود.

بررسی نزدیک تر مراحل روندهای تحلیل که در بالا اشاره شد، تشابهات بسیاری را نشان می دهد. بهترین تشابه این است که تمام این روندهای تحلیل شامل ساخت یک مدل کامپیوتری و انجام تحلیل استاتیکی و پایداری است. با استخراج تشابهات در روندهای تحلیل و در نظر گرفتن این موضوع که منابع مهندسی به موثرترین حالت ممکن و تمام و کمال استفاده می شوند، می توان روش تحلیلی که ترجیح داده می شود را فرموله کرد که شامل آگاهی دهنده ترین قسمت های تمامی تحلیل ها می باشد و روندها را به ترتیب از تحلیل ساده به پیچیده برای اعتبارسنجی نتایج به کار برد. در نتیجه، روند تحلیلی از تحلیل استاتیکی الاستیک خطی ساده به تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی پیچیده پیشرفت می کند که به آن روش تحلیل پیش رونده گویند.

روش تحلیل پیش رونده نیازمند ارزیابی یک سازه برای حساسیت آن به انهدام پیش رونده در برابر معیار عملکرد واقع گرایانه افزایشی از طریق تحلیل هایی که دقت آن ها افزایش می یابد می باشد. روند با یک تحلیل استاتیکی الاستیک خطی شروع می شود. اگر ساختمان از این مرحله عبور کند، که نیازمندی های ارزیابی آن بسیار محافظه کارانه هستند، آن گاه تحلیل کامل می شود. اگر ساختمان منهدم شود، از تحلیل غیرخطی و خطی پیچیده استفاده می شود. در هر مرحله، عملکرد ساختمان در مقابل معیارهایی با محافظه کاری کمتر آزموده می شود. اگر روش های ساده تر تحلیل با به کار گیری آئین نامه های روند تحلیل قابل اعمال منتخب همچون FEMA، GSA، DOD با توجه به پیچیدگی سازه قابل اعمال باشد، روند ارزیابی سازه بعد از اینکه ساختمان معیارهای ارزیابی متناسب با روند تحلیل مربوطه را پیدا می کند، متوقف می شود. این رویکرد از پایداری مدل کامپیوتری اطمینان حاصل می کند و نتایج در هر مرحله از تحلیل از طریق مقایسه و ارزیابی نتایج با نتایج تحلیل بدست آمده در مرحله قبل اعتبارسنجی می شود. این رویکرد همچنین نتایج پیشرفت در ارتباط با روش های متداول (مکانیک مصالح، حرکت سازه، استاتیک و دینامیک) را بدست می آورد. دو مزیت روند تحلیل پیش رونده شامل :

- مدت تحلیل پیش رونده سادگی روش تحلیل استاتیکی الاستیک خطی و همچنین استحکام روش های تحلیل پیشرفته را دربرگرفته چرا که همه روندهای تحلیل را دربرمی گیرد.

- از آنجا که تحلیل انهدام پیش رونده از روش تحلیل ساده تر تا متد پیچیده تری تغییر می کند، نتایج به راحتی با مقایسه نتایج روش تحلیل ساده تر با روش تحلیل پیچیده تر در هر مرحله از روند تحلیل اعتبارسنجی می شود.

نتیجه گیری ها و توصیه ها :

ساده ترین متد تحلیل شامل روندهای الاستیک خطی استاتیکی هستند و در پیچیده ترین حالت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می باشد. چندین آئین نامه طراحی متدهای عالی در رابطه با انتخاب روند تحلیل ارائه می دهند که استفاده از متدهای تحلیل ساده تر برای سازه های نسبتا ساده را ممکن می سازد و لذا در زمان مهندسی و منابع کامپیوتری صرفه جویی می کند، هرچند که روندهای تحلیل ساده به نسبت روندهای تحلیل پیچیده تر معیار ارزیابی محافظه کارانه تری برای پاسخ به کار می برند. انتظار می رود که به دلیل دقیق تر بودن تخمین توزیع بار و معیار ارزیابی، دقت کمتر روش های پیچیده تر نتیجه آن پاسخ سازه ای شود که مقدار کمی شدید می باشد. معیار ارزیابی برای روندهای تحلیل خطی (استاتیکی و دینامیکی) در مقایسه با روندهای تحلیل غیرخطی به نظر بسیار دست باز هستند چرا که در تحلیل، دریافتیم که سازه نمونه معیار عملکرد خطی را تایید می کند ولی در روندهای تحلیل غیرخطی تقریبا مردود می شود. مطالعات قبلی همچنین نشان دهنده غیرمحافظه کارانه روندهای تحلیل استاتیکی است.

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 تر مقدار را داراست، لذا 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. در حالتی که یک ستون کناری حذف شود، قابی که ستون مذکور در داخل (و نه در انتها) آن، بیش ترین نقش را باز توزیع نیروها بر عهده خواهد داشته باشد. همچنین چنان چه یک ستون گوشه حذف گردد، دو ستون مجاور آن در قاب هایی که ستون محذوف جزئی از آن ها است، سهمی در برابر باز توزیع بارها 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 به وقوع می پیوندد. ستون های گوشه سازه سهم کمتری از بارهای ثقلی و مقاطع طراحی ضعیف تری دارند. پس با حذف ستون گوشه روند غیرخطی شدن امتدادشان در طبقات بالا به صورت گسترده تری رخ داده و در بعضی از مواقع گسیختگی مدل از اینجا شروع می شود. این موضوع ضعف نسبی مقاطع ستون های گوشه نسبت به تیرهای حوالی آن ها را به ما نشان می دهد.

حذف یک ستون در طبقه بالا به نسبت حذف ستون در طبقه پایین تر با احتمال بیش تری کشیده به انهدام پیش رونده می شود. علت این امر نبود عملکرد قابی ویریندیل بعد از حذف ستون طبقه بالا است. برای سناریو های مدل سازی شده که سازه بدون ایجاد تغییر مکان قائم بزرگ با انهدام پیش رونده مقابله می کند مقاومت عمدتا توسط عملکرد قابی ویریندیل^۶ و اثر متقابل نیرو-ممان بار فشاری محوری در تیرها^۷ تامین می گردد. توانایی سازه برای ایجاد عملکرد قابی ویریندیل در مقاومت در برابر خرابی پیش رونده ضروری است و مدل هایی از سازه که دارای حداقل دو طبقه (وستون های متصل) بالای ستون حذف شده باشند کم تر در برابر خرابی حساس هستند زیرا عملکرد قابی ویریندیل می تواند به طور موثری انجام شود. به علاوه، افزایش تعداد طبقات باعث افزایش مقاومت سازه در مقابل خرابی پیش رونده می گردد ولی این موضوع محدودیت هایی دارد. با افزایش تعداد طبقات خطر خرابی در تیرها کم می شود چون سختی تیرهای بالاتر به شکل فنرهای موازی عمل می کنند ولی درصد افزایش بار محوری ستون های مجاور ستون محذوف با اضافه شدن تعداد طبقات زیاد می شود که این افزایش بار محوری تا مرز تخریب ستون ها قابل قبول است.

روندهای تحلیل بهتر است در دو دسته خطی و غیرخطی طبقه بندی شوند چرا که روندهای تحلیل استاتیکی و دینامیکی برای هر دو حالت خطی و غیرخطی مکمل یکدیگر هستند. ضریب بزرگنمایی دینامیکی^۲ (در معادله ۱) تخمین خوبی برای روندهای تحلیل استاتیکی است، چرا که روندهای تحلیل استاتیکی خطی و دینامیکی غیرخطی تقریبا به حداکثر انحنای یکسانی می رسند. استفاده از ضریب^۲ توصیه می شود. لازم به ذکر است که به دلیل دو برابر بودن ترکیب بار تحلیل استاتیکی خطی قائم نسبت به

⁶Vierendeel Frame Action

⁷Compressive Arch Action

تحلیل تاریخچه زمانی، با حذف ستون در طبقات بالاتر در شرایطی که عملکرد وریندیل^۸ کمک به سزایی به مقابله با خرابی پیش رونده نکرده و مقادیر تغییرمکان های قائم گره فوقانی ستون محذوف بسیار افزایش می یابد. زمانی که پاسخ غیرخطی سازه به سادگی و مستقیما قابل پیش بینی باشد، می توان روند تحلیل دینامیکی خطی را مورد استفاده قرار داد. نتایج تحلیل استاتیکی خطی می تواند برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل با مقایسه حداکثر انحنای دینامیکی با انحنای استاتیکی به دلیل ترکیب بار بزرگ شده (با ضریب ۲) استفاده می شود. زمانی که هر دو پاسخ دینامیکی و غیرخطی سازه نمی توانند به سادگی و مستقیما پیش بینی گردند، بهتر است از روندهای تحلیل غیرخطی استفاده شود. برای روند تحلیل استاتیکی غیرخطی، حداکثر باری که تحمل می کند بهتر است بیش از ۵۰٪ معادله ۱ باشد.

از آن جا که خرابی پیش رونده با آسیب نسبتا کوچکی آغاز گشته، تحلیل پوش داون^۹ فقط تعداد محدودی از المان ها را درگیر می کند و المان های دور از محل واقعه آغازگر^{۱۰} تسلیم نخواهند شد. به علاوه، چون در ستون های سیستم قاب خمشی که بالای ستون حذف شده واقع شده اند، تغییرشکل بزرگی ایجاد نمی شود، شکست یک المان سازه ای مانند تیر، منجر به شکست المان تیرهای بالاتر و لذا ایجاد خرابی پیش رونده می شود. بنابراین تحلیل پوش داون برای ارزیابی خرابی پیش رونده مقادیر محافظه کارانه ای را به مهندسان می دهد. این در حالی است که در تحلیل دینامیکی غیرخطی با حذف دینامیکی یک عضو اصلی باربر، به مصالح اجازه رفتار غیرخطی داده می شود که باعث ایجاد تغییرشکل های بزرگ می شود. توصیه ما برای تعیین احتمال وقوع انهدام پیش رونده، از یک روند تحلیل پیش رونده^{۱۱} استفاده شود. در تحلیل پیش رونده، پاسخ یک سازه با شروع اسلوب و شیوه استاتیکی ساده تر شروع می شود و سپس در حد نیاز، پیچیدگی متد تحلیل را افزایش داده تا جایی که احتمال انهدام پیش رونده پایین تعیین شود و یا همه سبک های مهندسی موجود از بین بروند. مزایای این طریقه سادگی نسبی در محاسبات و همچنین سادگی ارزیابی نتایج می باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده از آنالیز استاتیکی غیرخطی به همراه آنالیز دینامیکی غیرخطی به عنوان تحلیل مکمل جهت تعیین ظرفیت نهایی و تسلیم سازه جهت تایید اعتبار شکل پذیری و چرخش مفاصل در روش تحلیل دینامیکی غیرخطی توصیه می گردد.

منابع و مراجع

- [۱] American Society of Civil Engineers, "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE/SEI41-06", Reston, Virginia, USA, 2007.
- [۲] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Pre-standard commentary for seismic rehabilitation of buildings", Washington, D.C.
- [۳] General Services Administration, "Alternative Path Analysis & Design Guidelines For Progressive Collapse Resistance", GSA, October 2013.
- [۴] Interagency Security Committee, "Security Design Criteria For Federal Facilities", ISC, April 2010.
- [۵] 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.
- [۶] U.S. Department of Defense (DoD), "Design of building to resist progressive collapse, UFC 4-023-03, Unified Facility Criteria", Washington D.C., June 2013.
- [۷] 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.
- [۸] "Robustness Assessment for Progressive Collapse of Framed Structures using Pushdown Analysis Method", University of Harbin, 2010.
- [۹] British Standard (BS), "Guide to durability of buildings and building elements, products and components, BS 7543", UK, 2015.
- [۱۰] European Technical Standards (Eurocode), "EN 1991 Eurocode 1: Actions on Structures", Commission of the European Committees, Brussels, 1991.

⁸Vierendeel Action

⁹Pushdown Analysis

¹⁰Initiating Event

¹¹Progressive Analysis

- Sasani, M., Sagioglu, S., "Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures: A Multi-Hazard Perspective", *ACI Structural Journal*, Volume 105, Issue 1, Pages 96-103, 2008. [۱۱]
- Tsai, M.H. and Lin, B.H., "Investigation of Progressive Collapse Resistance and Inelastic Response for an Earthquake-Resistant RC Building Subjected to Column Failure", *Engineering Structures*, 2008. [۱۲]
- Sasani, M., "Response of a Reinforced Concrete In-Filled Frame Structure to Removal of Two Adjacent Columns", *Engineering Structures*, 2008. [۱۳]
- 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. [۱۴]
- Talaat, M., Khalid, M. M., "Modeling Progressive Collapse in Reinforced Concrete Building Using Direct Element Removal", University of California, Berkley, 2009. [۱۵]
- Sasani, M., Kropelnicki, J., "Progressive Collapse Analysis of RC Structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17, Pages 757-771, 2007. [۱۶]
- Applied Technology Council (ATC), "Seismic Performance Assessment of Buildings, ATC-58", Redwood City, CA, 2011. [۱۷]
- 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. [۱۸]
- ACI-318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and commentary, ACI 318-14", Detroit (MI), 2011. [۱۹]
- 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. [۲۰]
- Bazan, M.L., "Response of reinforced concrete elements and structures following loss of load bearing elements", Ph.D. Thesis, Northeastern University, January 2008. [۲۱]
- 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. [۲۲]
- 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. [۲۳]
- Marjanishvili, S., "Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Volume 18, Issue 2, Pages 279-285, May 2004. [۲۴]
- Krawinkler, H., Seneviratba, G., "Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation", *Engineering Structures*, Volume 20, Issue 4, Pages 452-464, 1998. [۲۵]
- Whittaker, A., Hamburger, R., Mahoney, M., "Performance-Based Engineering of Buildings for Extreme Events", <http://www.AISC.org> [۲۶]
- Mertter, 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. [۲۷]

Assessment of Reinforced Concrete Structures' Behavior under Column Removal Scenarios

Abstract

The term progressive collapse is mostly used to illustrate gradual expanding of local collapse, from some elements to other parts of the structure. This phenomenon can cause death of large number of people as well as economical and security problems. Due to the undeniable effects of this phenomenon on people's lives, after the collapse of World Trade Center, an increasing interest has caught Governments and organizations' eye to determine the potential of progressive collapse in existing buildings and design of progressive collapse resistant new buildings. In this Study a typical reinforced concrete moment frame structure is designed and the potential of progressive collapse in the aforementioned building is assessed by three dimensional analysis of Progressive collapse guidelines; these procedures include: Linear Elastic Static, Non-linear Static, Linear Dynamic and Non-Linear Dynamic analysis. Advantages and disadvantages of each procedure is studied and it is concluded that the most effective analysis procedure to determine the potential of progressive collapse should have all the advantages of these four procedures and includes the systematic use of combination of high risk analysis results of progressive collapse. In these analyses internal and external columns are removed from all stories and the results are used to determine the effects of placement of removed columns. Analyses results prove the removal of a column in higher stories has a higher chance of causing progressive collapse due to the impossibility of Vierendeel frame action after removing a higher story column. In the five-story building, four analysis procedures are compared and beam sections have been corrected if needed. Moreover, the role of columns adjacent to the removed column in load redistribution and load transfer in higher story frames are studied.

Keywords:

Progressive Collapse, Comparative Study, Moment Frame Reinforced Concrete Structure, Nonlinear Analysis, Column Removal in Stories, Load Redistribution, Removed Column Placement, Dynamic Analysis