

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال نهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷، (پیاپی ۳۵): صص ۳۳-۲۱

مطالعه خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی بتن مسلح ویژه، ناشی از حذف ناگهانی ستون

بیت‌اله بدرلو*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در مباحث سازه‌ای پدافند غیرعامل مطرح می‌شود، بحث خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها است. خرابی پیش‌رونده در یک سازه زمانی رخ می‌دهد که اعضای سازه‌ای سیستم باربر اصلی به‌طور ناگهانی حذف شود و اعضای سازه‌ای باقی‌مانده قادر به تحمل وزن سازه نباشند و در نتیجه، سازه دچار خرابی و شکست گردد. هدف اصلی از تحقیق حاضر، ارزیابی ظرفیت خرابی پیش‌رونده قاب‌های خمشی بتن مسلح ویژه طراحی شده بر اساس مبانی مقررات ملی ساختمان می‌باشد. در این مقاله با استفاده از دو روش تحلیل استاتیکی خطی و استاتیکی غیرخطی (پوش عمودی) ظرفیت قاب‌های خمشی بتن مسلح با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۷ در برابر خرابی پیش‌رونده، تحت دو سناریوی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده قاب‌های مورد مطالعه بر اساس ضوابط آخرین ویرایش استاندارد UFC 4-023-03 صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، نتایج نظیر تحلیل استاتیکی خطی در مقایسه با نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد. همچنین رفتار المان‌های تیر در مقایسه با رفتار المان‌های ستون در برابر خرابی پیش‌رونده آسیب‌پذیرتر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: خرابی پیش‌رونده، قاب خمشی بتن مسلح ویژه، پوش عمودی، تحلیل غیرخطی، تحلیل استاتیکی

۱- مقدمه

خرابی پیش‌رونده پدیده‌ای است که در آن خسارت و گسیختگی یک یا چند عضو سازه‌ای باعث ایجاد خسارت کلی در سازه می‌گردد. در واقع در این حالت وقوع خرابی موضعی در بخشی از سازه که می‌تواند ناشی از عواملی از قبیل انفجار (حملات نظامی و تروریستی)، آتش‌سوزی، برخورد وسایل نقلیه و نشست ناگهانی شالوده سازه رخ دهد، منجر به خرابی کلی و یا خرابی نامتناسب بخش بزرگی از سازه می‌گردد. در این نوع خرابی حذف ناگهانی یک ستون و یا یک دیوار در کسری از تانیه اتفاق می‌افتد و بدین ترتیب ساختمان به صورت دینامیکی دچار تغییرشکل می‌شود.

توجه به موضوع خرابی پیش‌رونده از سوی محققین اولین بار به خاطر خرابی موضعی ساختمان ۲۲ طبقه رونان پوینت در لندن که در سال ۱۹۶۸ اتفاق افتاد به‌وجود آمد. در ادامه واقعه ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ به عنوان یک نیروی محرک توجه بیشتری در محققین نسبت به این موضوع ایجاد نمود و بدین ترتیب زمینه ارتقاء استانداردها و آیین‌نامه‌ها در خصوص خرابی پیش‌رونده فراهم گردید [۱]. از جمله آیین‌نامه‌های معتبر که به‌طور ویژه‌ای به موضوع خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌ها پرداخته‌اند می‌توان به آیین‌نامه‌های GSA [۲] و DOD [۳] اشاره نمود، در این آیین‌نامه‌ها به‌منظور طراحی و ارزیابی سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده روش تحلیل مسیر جایگزین (APM) پیشنهاد گردیده است. اساس این روش مبتنی بر این قاعده می‌باشد که اگر به هر دلیلی یکی از اعضای اصلی سازه که بارهای ثقلی را تحمل می‌نماید، دچار تخریب ناگهانی شود، می‌بایست مسیرهای جایگزینی جهت انتقال نیرو به دیگر قسمت‌های آسیب ندیده سازه وجود داشته باشد تا بدین ترتیب از خرابی کلی سازه جلوگیری شود. در روش مسیر جایگزین روش‌های تحلیلی معتبر شامل روش‌های تحلیل استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی می‌باشد که روش‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بدون هرگونه محدودیتی برای همه سازه‌ها قابل استفاده است. در حالی که به‌کارگیری روش استاتیکی خطی برای سازه‌های نامنظم دارای محدودیت و ممنوعیت می‌باشد. Kim و همکاران ظرفیت خرابی پیش‌رونده قاب‌های خمشی فولادی را با استفاده از آیین‌نامه‌های GSA2003 و DOD مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق از دو روش تحلیل استاتیکی خطی و دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد، پاسخ‌های سازه‌ای نظیر روش تحلیل دینامیکی غیرخطی به‌طور قابل توجهی متفاوت و به مراتب بزرگتر از نتایج نظیر روش تحلیل استاتیکی خطی می‌باشد. به‌علاوه نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی خطی برای پتانسیل خرابی پیش‌رونده سازه‌ها بسیار محافظه‌کارانه

می‌باشد [۴]. Powel طی تحقیقی روش‌های تحلیل استاتیکی خطی (LS)، استاتیکی غیرخطی (NS) و دینامیکی غیرخطی (ND) را با یکدیگر مقایسه نمود و به این نتیجه رسید که ضریب ضربه ۲ که برای تحلیل استاتیکی خطی در نظر گرفته شده است، نتایج بسیار محافظه‌کارانه‌ای می‌دهد. بر همین اساس در این تحقیق استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد تاکید قرار گرفته است [۵]. Sheriff و همکاران رفتار اتصال در یک قاب خمشی فولادی را با استفاده از مدل‌سازی ماکرو مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق مشخص گردید که مدل‌سازی ماکرو روش بسیار مناسبی به‌منظور مدل‌سازی دقیق پدیده خرابی پیش‌رونده در یک قاب جزء می‌باشد [۶]. Yihai Bao با ارائه یک مدل دو بعدی ماکرو مدل‌سازی رفتار غیرخطی اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی بتن مسلح را با استفاده از مدل‌های ماکرو مورد مطالعه قرار داد. بر اساس نتایج حاصل و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی مشخص گردید که استفاده از مدل‌های ماکرو روش بسیار مناسبی برای تحلیل خرابی پیش‌رونده می‌باشد [۷]. Helmy و همکاران خرابی پیش‌رونده در سازه ۱۰ طبقه بتن مسلح را بر اساس دستورالعمل UFC مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که به‌منظور طراحی اقتصادی سازه، می‌بایست پس از حذف ستون اثرات دال‌ها در محاسبات سازه در نظر گرفته شود. به‌علاوه، نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که سازه‌های بتن مسلح طراحی‌شده بر اساس آیین‌نامه ACI شرایط و محدودیت‌های دستورالعمل UFC را ارضا نمی‌کنند و بدین ترتیب این دسته از سازه‌ها از پتانسیل خرابی پیش‌رونده بالایی ناشی از حذف دیوار و یا ستون برخوردار می‌باشند [۸]. Zahrai و همکاران با هدف ارائه یک روش تحلیلی ساده به‌منظور برآورد پتانسیل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های بتنی، دو مدل ساختمان بتن مسلح ۵ و ۱۰ طبقه با سیستم سازه‌ای قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق پتانسیل خرابی پیش‌رونده مدل‌های ساختمانی مورد مطالعه بر اساس ضوابط دستورالعمل GSA و با استفاده از ۴ روش تحلیل استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی، دینامیکی خطی و دینامیکی غیرخطی برآورد گردیده است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق مشخص گردید که استفاده از روش‌های تحلیل دینامیکی در عین پیچیدگی نتایج بسیار دقیق‌تری را نیز فراهم می‌نماید [۹]. Liu با انتخاب چند سازه فولادی و طراحی آن‌ها بر اساس چهار حالت مختلف، تاثیر نوع تحلیل خرابی پیش‌رونده را بر اقتصاد طرح مطالعه نمود. در حالت اول سازه‌ها بدون لحاظ نمودن تاثیرات خرابی پیش‌رونده طراحی شدند ولی در حالت‌های بعدی تاثیرات خرابی پیش‌رونده نیز مدنظر قرار گرفت. به منظور اعمال اثرات خرابی پیش‌رونده به‌طور جداگانه‌ای از سه روش تحلیل

ستون در طبقات همکف، میانی و انتهایی با استفاده از نرم‌افزار ETABS تحلیل شدند. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق که بر اساس تحلیل خطی و غیرخطی استاتیکی استوار می‌باشد نشان‌دهنده آن است که در مدل خاک نرم رفتار ساختمان‌های مورد مطالعه اندکی تشدید می‌گردد و در حالت تکیه‌گاه ثابت منجر به رفتار بهتری می‌شود. همچنین بر اساس نتایج حاصل مشاهده می‌گردد تاثیر تغییر شرایط تکیه‌گاهی برای سناریوهای حذف ستون در طبقات بالاتر کم‌تر می‌باشد [۱۳]. Tavakoli و همکاران پتانسیل خرابی پیش‌رونده قاب‌های خمشی فولادی را تحت بارگذاری جانبی مطالعه کردند. در این تحقیق مدل‌های مورد مطالعه شامل ساختمان‌های ۵ و ۱۵ طبقه با تعداد دهانه‌های ۴ و ۶ بودند که برای سناریوهای مختلف حذف ستون به صورت دو بعدی و سه بعدی تحلیل شدند. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق مشاهده گردید که سازه در سناریوی حذف ستون میانی در مقایسه با سناریوی حذف ستون گوشه مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهد و به‌علاوه، مدل‌های دو بعدی در مقایسه با مدل‌های سه‌بعدی مورد مطالعه حساسیت بالاتری نسبت به سناریوی حذف ستون از خود نشان می‌دهند [۱۴]. Karuna و همکاران خرابی پیش‌رونده در قاب‌های ساختمانی بتن مسلح را بر اساس ضوابط دستورالعمل GSA مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این تحقیق مدل مورد مطالعه شامل یک ساختمان بتنی ۱۰ طبقه می‌باشد که برای نواحی لرزه‌خیزی مختلف (۴ سطح خطر مختلف) طراحی شده است. در این تحقیق بر اساس نتایج تحلیل استاتیکی خطی که با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 انجام شده است پارامترهای خیز قائم، تغییر مکان نسبی طبقات و DCR در مدل‌های تحقیق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۱۵]. Choubey و همکاران رفتار چهار ساختمان بتن مسلح را که بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی ملاک عمل کشور هند طراحی شده‌اند، در برابر خرابی پیش‌رونده مطالعه نمودند. در این تحقیق تغییرات ایجادشده در مقادیر نیروهای داخلی (شامل خمش، برش و نیروی محوری) تیرهای مجاور ستون حذف‌شده مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی از این تحقیق ارائه یک روش ساده‌شده به‌منظور تحلیل سریع سازه‌ها برای شرایط شکست مختلف و در نتیجه بهینه کردن سازه برای انواع مختلف سناریوهای رفتاری می‌باشد [۱۶].

تحقیق حاضر ظرفیت خرابی پیش‌رونده قاب‌های خمشی بتنی ویژه ۳، ۵ و ۷ طبقه را که بر اساس آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله [۱۷]، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۸] و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۱۹] بارگذاری و طراحی شده‌اند را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این تحقیق با استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی خطی و استاتیکی غیرخطی و با به‌کارگیری روش مسیر بار

استاتیکی خطی (LS)، استاتیکی غیرخطی (NS) و دینامیکی غیرخطی (ND) استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق مشخص گردید که لحاظ اثرات خرابی پیش‌رونده در مرحله طراحی، سازه‌ها را سنگین‌تر می‌کند. در این تحقیق افزایش وزن سازه برای هریک از روش‌های تحلیل‌های استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی به ترتیب برابر ۳۸/۸ درصد، ۱۳/۲ درصد و ۸/۲ درصد به‌دست آمد [۱۰]. Massimi liano و همکاران ظرفیت خرابی پیش‌رونده قاب‌های خمشی فولادی ناشی از حذف ستون را با استفاده از تحلیل پوش عمودی (Pushdown) مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این تحقیق در مجموع شش قاب فولادی با تعداد دهانه‌های ۳ و ۵ و تعداد طبقات ۳، ۵، ۷ و ۹ که بر اساس آیین‌نامه لرزه‌ای ایتالیا طراحی شده‌اند با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحلیل شدند. به‌منظور برآورد پتانسیل خرابی قاب‌های مورد مطالعه روش‌های تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق بر اساس نتایج نظیر تحلیل استاتیکی غیرخطی مشخص گردید که قاب‌های خمشی فولادی دارای پتانسیل بالایی برای خرابی پیش‌رونده می‌باشند که این پتانسیل در قاب‌های با تعداد طبقات بالاتر افزوده می‌گردد. همچنین نتایج نظیر تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان دهنده آن است که قاب‌های ۳ طبقه مقاومت خوب و کاملی در برابر خرابی پیش‌رونده از خود نشان می‌دهند در حالی‌که در خصوص قاب‌های ۵ دهانه چنین چیزی مشاهده نمی‌گردد [۱۱]. Karimiyan و همکاران خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های بتن مسلح منظم و نامنظم میان مرتبه و بلند مرتبه را تحت نیروهای زلزله مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این تحقیق ساختمان‌های ۶، ۹ و ۱۲ طبقه با خروج از مرکزیت‌های جرمی ۰، ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار OPENSEES تحت ۲۲ رکورد زلزله تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه شدند. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق مشخص گردید که در ساختمان‌های نامتقارن با افزایش مقدار خروج از مرکزیت ناپایداری و فروریزش آن‌ها سریع‌تر و در نتیجه شکل‌گیری تعداد مفاصل پلاستیک کم‌تری رخ می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق مشخص گردید که در ساختمان‌های متقارن و نامتقارن میان مرتبه و بلند مرتبه، با افزایش خروج از مرکزیت جرمی تغییر مکان نسبی طبقات در لبه‌های صلب کاهش و نزدیک و در مواردی برابر با تغییر مکان نسبی نظیر مرکز جرم می‌شود [۱۲]. Tharwat تاثیر اندرکنش خاک و سازه روی مقاومت خرابی پیش‌رونده ساختمان‌های بتن مسلح را بر اساس ضوابط دستورالعمل UFC-4-023-03 مطالعه نمود. مدل‌های ساختمانی مورد مطالعه در این تحقیق شامل ساختمان‌های ۳ و ۷ طبقه می‌باشند که برای شرایط تکیه‌گاهی ثابت، خاک نرم و خاک سخت و سناریوهای حذف

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح (بتن و میلگرد) مورد استفاده

نوع مشخصه	بتن	فولا
f_c (kg/cm^2)	۲۵۰	---
f_y (kg/cm^2)	-----	۴۰
f_{ys} (kg/cm^2)	-----	۳۰
v	۰/۲	۰/۳
E (kg/cm^2)	14×10^5	10^6
ρ (kg/m^3)	۲۴۰۰	۷۸

جدول ۲- مشخصات بارهای ثقیلی وارد بر قابها

نوع بار	طبقات (kg/m)	بام (kg/m)
مرده (DL)	۲۵۰۰	۲۷۵۰
زنده (LL)	۱۰۰۰	۷۵۰
دیوار (Wall)	۶۰۰	۳۰۰

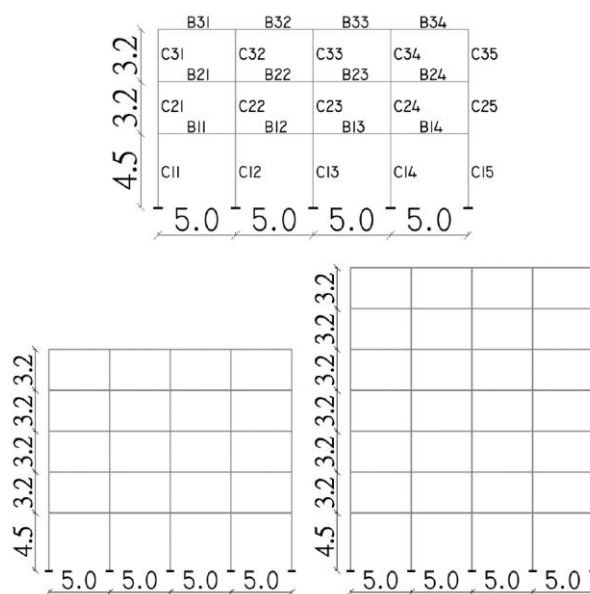
۳- روش‌های تحلیل خرابی پیش‌رونده

روش‌های تحلیل برای برآورد پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها بسیار وسیع می‌باشد، به گونه‌ای که از روش‌های تحلیلی استاتیکی خطی شروع شده و تا روش تحلیل دینامیکی غیرخطی ادامه می‌یابد. بارهای ناگهانی و غیرعادی به دلیل اعمال در یک مدت زمان بسیار کوتاه خاصیتی شبیه به بارهای دینامیکی دارند و به علاوه سازه‌ها در مقابل این دسته از بارها دارای رفتار غیرخطی می‌باشند. با این وجود آیین‌نامه DOD (آیین‌نامه ملاک عمل در این تحقیق که یکی از آیین‌نامه‌های پیشرو در زمینه برآورد پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها می‌باشد)، جهت بررسی رفتار سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده سه روش تحلیل استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی را معتبر می‌داند. بر اساس ضوابط آیین‌نامه DOD روش استاتیکی خطی تنها برای سازه‌های منظم قابلیت استفاده دارد، در حالی که روش‌های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی بدون هیچ محدودیتی برای همه انواع سازه‌ها می‌تواند به کار برده شود.

جایگزین (APM) بر اساس ضوابط استاندارد UFC4-023-03-2016 ضمن برآورد ظرفیت خرابی پیش‌رونده در قاب‌های مورد مطالعه، نقاط ضعف و قوت هریک از روش‌های تحلیلی به کار رفته نیز مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌های مورد مطالعه

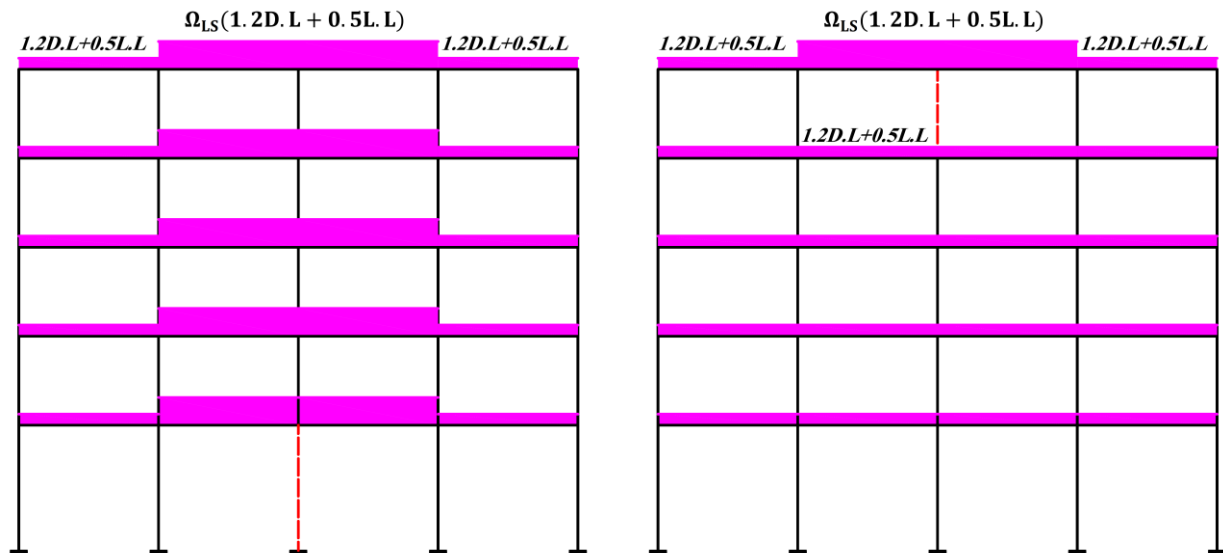
در این تحقیق مدل‌های مورد مطالعه که در شکل (۱) نشان داده شده است شامل قاب‌های خمشی بتنی ویژه (با شکل‌پذیری زیاد) با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۷ می‌باشد. با توجه به کاربری ساختمان ارتفاع طبقه همکف برابر با ۴/۵ متر و ارتفاع دیگر طبقات برابر ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. آیین‌نامه‌های ملاک عمل برای بارگذاری و طراحی این قاب‌ها به ترتیب مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان می‌باشد که بر این اساس مشخصات مصالح و بارگذاری ثقیلی و جانبی به کار رفته برای قاب‌های مورد نظر در جداول (۱) الی (۳) آورده شده است. در این تحقیق با انتخاب ۲ سناریوی خرابی مختلف؛ شامل سناریوی حذف ستون میانی طبقه همکف (سناریوی خرابی اول) و سناریوی حذف ستون میانی طبقه آخر (سناریوی خرابی دوم)؛ برای هر یک از قاب‌ها در مجموع ۶ الگوی خرابی مورد مطالعه و بررسی می‌باشد. خرابی پیش‌رونده در هریک از الگوهای خرابی با استفاده از دو روش تحلیل استاتیکی خطی و استاتیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱- قاب‌های خمشی ویژه بتن مسلح مورد مطالعه

جدول ۳- مشخصات و پارامترهای بارگذاری لرزه ای قاب‌های مورد مطالعه

قاب	T ₀	T _s	S	H (m)	T=0.05H ^{0.9}	A	B	I	R _u	C
سه	۰/۱	۰/۵	۱/۵	۱۰/۹	۰/۴۲۹	۰/۳۵	۲/۵	۱	۷/۵	۰/۱۱۷
پنج	۰/۱	۰/۵	۱/۵	۱۷/۳	۰/۶۵۰	۰/۳۵	۱/۹۸	۱	۷/۵	۰/۰۹۲۴
هفت	۰/۱	۰/۵	۱/۵	۲۳/۷	۰/۸۶۳	۰/۳۵	۱/۵۵	۱	۷/۵	۰/۰۷۲۳

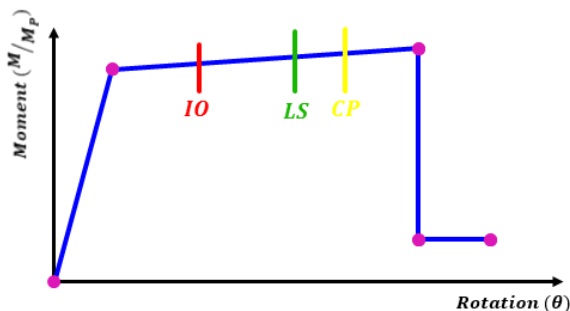


شکل ۲- الگوی بارگذاری ملاک عمل جهت ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در روش تحلیل استاتیکی خطی

$$\Omega_{ls}=1.2m_{LIF}+0.8$$

(۲)

در رابطه (۱) DL و LL به ترتیب معرف بارهای مرده و زنده می‌باشند. الگوی بارگذاری معرفی شده و ملاک عمل در این روش تحلیلی به عنوان نمونه برای قاب پنج طبقه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۳- شماتیک منحنی نیرو- تغییرشکل المان‌های تیر و ستون

۳-۲- تحلیل استاتیکی غیرخطی (NLS)

روش تحلیل استاتیکی غیرخطی که بر مبنای روش تحلیل پوش‌آور عموماً در مهندسی زلزله کاربرد دارد، به‌طور گسترده‌ای به‌منظور

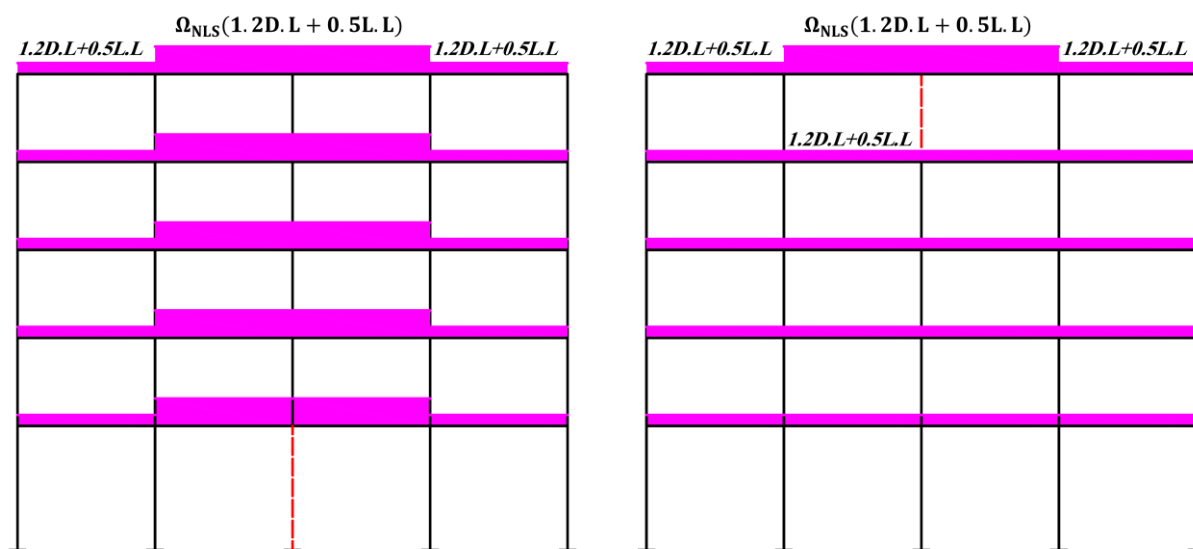
۳-۱- تحلیل استاتیکی خطی (LS)

روش تحلیل استاتیکی خطی به‌عنوان ساده‌ترین و سریع‌ترین روش برای ارزیابی رفتار سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده محسوب می‌شود که مطابق ضوابط آیین‌نامه DOD تنها برای سازه‌های منظم قابل استفاده می‌باشد. در این روش به‌منظور ارزیابی رفتار سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده کلیه دهانه‌های سازه تحت ترکیب بارگذاری معرفی شده در رابطه (۱) قرار می‌گیرند، در حالی‌که در آن بارهای نظیر دهانه‌های واقع در محدوده فوقانی ستون حذف شده با ضریب تحت عنوان ضریب افزایش بار (Ω_{LS}) تشدید شده است. ضریب Ω_{LS} برای قاب‌های خمشی بتن مسلح مورد مطالعه بر اساس رابطه (۲) تعیین می‌گردد که در آن پارامتر m_{LIF} معرف کوچک‌ترین ضریب بزرگنمایی (m) تیرهای متصل به ستون‌های واقع در بالای ستون حذف شده می‌باشد. بر این اساس در تحقیق حاضر مقدار ضریب m_{LIF} بر اساس ضوابط آیین‌نامه ASCE-41 [۲۰] برابر با ۲ تعیین شده است که بدین ترتیب ضریب تشدید Ω_{ls} برای کلیه قاب‌های مورد مطالعه برابر با ۳/۲ به‌دست می‌آید.

$$G=1.2DL+0.5LL$$

(۱)

ستون حذف شده در هر مرحله از تحلیل، مقاومت سازه و سطوح عملکرد آن در برابر این تغییر شکل‌ها بر اساس مدل رفتاری تعریف شده برای هر یک از اعضا مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل رفتاری بار تغییر مکان به کار رفته برای هر یک از المان‌ها که به صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است مطابق ضوابط آیین‌نامه ASCE 41 [۲۰] تعریف گردیده است.



شکل ۴- الگوی بارگذاری ملاک عمل جهت ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی

عمل برای تحلیل کل سازه بر اساس حداقل مقدار $\frac{\theta_{Pra}}{\theta_y}$ نظیر تیرهای متصل به ستون‌های واقع در بالای ستون با محاسبه مقادیر θ_{Pra} ، θ_y و Ω_{NLS} نظیر هر یک از المان‌های تیر و ستون، ضریب Ω_{NLS} نظیر هر یک از قاب‌ها تحت سناریوهای خرابی مورد مطالعه به شرح جدول (۴) برآورد گردیده است.

$$\Omega_{NLS} = 1.04 + 0.45 / (\theta_{Pra} / \theta_y + 0.48) \quad (3)$$

۴- مطالعه سناریوهای خرابی

در این بخش از تحقیق پس از مدل‌سازی و تحلیل مدل‌های مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار SAP2000، نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی خطی و استاتیکی غیرخطی مدل‌ها برای سناریوهای خرابی پیش‌رونده نظیر حذف ستون میانی در طبقات همکف و آخر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- نتایج تحلیل استاتیکی خطی

در این روش تحلیل پارامتر DCR (نسبت نیرو به ظرفیت) محاسبه شده برای اعضای سازه معیاری برای ارزیابی پتانسیل خرابی

بررسی عملکرد سازه‌ای ساختمان‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده نیز مورد استفاده می‌باشد. از جمله مزایای این روش تحلیل؛ که تحت عنوان روش تحلیل پشوش عمودی (Pushdown Analysis) نیز شناخته می‌شود؛ می‌توان به توانایی در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مصالح بدون دخالت رفتار هیستریزیس مصالح و در نتیجه کاهش زمان تحلیل در مقایسه با تحلیل‌های تاریخچه زمانی اشاره نمود. بر اساس این روش تحلیل با افزایش نمودی تغییر مکان قائم در محل

در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، به منظور ارزیابی رفتار سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده کلیه دهانه‌های سازه تحت ترکیب بارگذاری معرفی شده در رابطه (۱) قرار می‌گیرند، در حالی که به منظور لحاظ اثرات دینامیکی حذف ستون؛ بارهای نظیر دهانه‌های واقع در محدوده فوقانی ستون حذف شده با ضریبی تحت عنوان ضریب افزایش بار دینامیکی (Ω_{NLS}) تشدید شده است. الگوی بارگذاری معرفی شده و ملاک عمل در این روش تحلیلی در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- ضریب افزایش بار دینامیکی (Ω_{NLS}) قاب‌های مورد مطالعه

سناریوی	سناریوی	قاب
۱/۲۰	۱/۲۴	سه طبقه
۱/۲۰	۱/۲۴	پنج طبقه
۱/۲۰	۱/۲۶	۷ طبقه

ضریب Ω_{NLS} برای قاب‌های خمشی بتن مسلح مورد مطالعه بر اساس رابطه (۳) تعیین می‌گردد که در آن θ_{Pra} معرف زاویه چرخش پلاستیک داده شده در جداول معیار پذیرش آیین‌نامه DOD برای سطح پاسخ سازه (ایمنی جانی یا آستانه فروریزش) و θ_y معرف زاویه دوران تسلیم عضو می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب Ω_{NLS} ملاک

پارامتر DCR المان‌های تیر و ستون مطابق روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شود. M_p معرف لنگر خمشی نهایی (لنگر پلاستیک) مقاطع تیرها و $M_{p(N)}$ معرف لنگر خمشی نهایی (لنگر پلاستیک) مقاطع ستون‌ها با لحاظ اندرکنش خمش و نیروی محوری می‌باشد.

$$DCR = \frac{M_{max}}{M_p} \quad (\text{تیرها}) \quad (۵)$$

(۶) (ستون‌ها با لحاظ اندرکنش خمش و نیروی محوری)

$$DCR = \frac{M_{max}}{M_{p(N)}}$$

پیش‌رونده در سازه‌ها می‌باشد. پارامتر DCR به صورت کلی مطابق رابطه (۴) تعریف می‌شود که در آن Q_{UD} معرف حداکثر نیروی ایجاد شده در اعضا در اثر ترکیبات بارگذاری مورد نظر و Q_{CE} معرف ظرفیت اعضا بر اساس مقاومت نهایی اجزای آن‌ها می‌باشد.

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{Q_{CE}} \quad (۴)$$

مطابق ضوابط دستورالعمل DOD، Q_{UD} معرف حداکثر نیروی (خمشی، برشی و محوری) ایجاد شده در اعضا در اثر ترکیب بارگذاری Q_{CE} و $\Omega_{LS.G}$ معرف ظرفیت نهایی اعضا می‌باشد که بدین ترتیب

جدول ۵- حداکثر لنگر خمشی، لنگر پلاستیک و نسبت DCR نظیر المان‌های قاب سه طبقه (مدل اصلی)

المان	M_{max}	N_{max}	M_p	DCR	المان	M_{max}	M_p	DCR
C11	۴/۱۲	۳۹/۴۲	۴۷/۷۲	۰/۰۸۶	B11	۱۰/۲۸	۳۱/۰۳	۰/۳۳۱
C12	۰/۲۰	۷۶/۱۳	۵۰/۵۳	۰/۰۰۴	B12	۴/۹۴	۳۱/۰۳	۰/۳۲۰
C13	۰	۷۵/۰۶	۵۰/۴۵	۰	B13	۴/۹۴	۳۱/۰۳	۰/۳۲۰
C14	۰/۲۰	۷۶/۱۳	۵۰/۵۳	۰/۰۰۴	B14	۱۰/۲۸	۳۱/۰۳	۰/۳۳۱
C15	۴/۱۲	۳۹/۴۲	۴۷/۷۲	۰/۰۸۶				
C21	۴/۶۴	۲۵/۲۵	۲۴/۶۳	۰/۱۸۸	B21	۹/۹۲	۲۷/۰۸	۰/۳۶۶
C22	۰/۱۴	۴۹/۵۰	۲۶/۳۷	۰/۰۰۵	B22	۹/۷۸	۲۷/۰۸	۰/۳۶۱
C23	۰	۴۸/۷۸	۲۶/۳۲	۰	B23	۹/۷۸	۲۷/۰۸	۰/۳۶۱
C24	۰/۱۴	۴۹/۵۰	۲۶/۳۷	۰/۰۰۵	B24	۹/۹۲	۲۷/۰۸	۰/۳۶۶
C25	۴/۶۴	۲۵/۲۵	۲۴/۶۳	۰/۱۸۸				
C31	۷/۵۳	۱۲/۲۱	۲۳/۴۵	۰/۳۲۱	B31	۱۰/۰۳	۱۹/۷۴	۰/۵۰۸
C32	۰/۵۲	۲۴/۴۹	۲۴/۵۸	۰/۰۲۱	B32	۹/۵۰	۱۹/۷۴	۰/۴۸۱
C33	۰	۲۳/۸۷	۲۴/۵۳	۰	B33	۹/۵۰	۱۹/۷۴	۰/۴۸۱
C34	۰/۵۲	۲۴/۴۹	۲۴/۵۸	۰/۰۲۱	B34	۱۰/۰۳	۱۹/۷۴	۰/۵۰۸
C35	۷/۵۳	۱۲/۲۱	۲۳/۴۵	۰/۳۲۱				

پارامترهای DCR، لنگر پلاستیک (M_p) و حداکثر لنگر خمشی (M_{max}) نظیر کلیه المان‌های تیر و ستون در سازه اصلی طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های ملاک عمل و سازه آسیب‌دیده تحت سناریوهای خرابی اول و دوم تحت ترکیبات بارگذاری متناظر به ترتیب در جداول (۵)، (۶) و (۷) ارائه شده است. برای قاب‌های ۵ و ۷ طبقه تنها به ارائه پارامتر DCR نظیر هر یک المان‌ها در وضعیت سازه اصلی (آسیب ندیده) و سازه‌های آسیب دیده اکتفا گردیده است و این منظور با نمایش عدد DCR نظیر هر یک از المان‌ها در وضعیت سازه آسیب‌ندیده و سازه آسیب‌دیده بر روی مدل سازه آسیب‌دیده، در شکل‌های (۵) و (۶) فراهم گردیده است. از دو عدد نشان‌داده شده در مجاورت هر المان، عدد بالایی معرف DCR المان در حالت سازه اصلی و عدد پایینی معرف DCR المان در حالت سازه آسیب‌دیده تحت سناریوی خرابی متناظر می‌باشد.

مطابق ضوابط آیین‌نامه‌های DOD و GSA در سازه‌های بتن مسلح مقادیر DCR هیچ یک از اعضای اصلی سازه نمی‌بایست از عدد ۲ تجاوز نماید، چرا که در غیر این صورت این دسته از سازه‌ها جزء سازه‌های مستعد و دارای پتانسیل بالا برای خرابی پیش‌رونده تلقی می‌شوند. مطابق معیار DCR آن دسته از اعضای سازه‌ای که دارای ضریب DCR بزرگتر از ۲ می‌باشند، در اثر وقوع خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف المان‌های اصلی سازه (مثل ستون) بسیار آسیب پذیر بوده و دچار خرابی شدید و گسترده‌ای خواهند شد. چرا که این دسته از اعضا از شکل‌پذیری کافی و مناسبی برای بازتوزیع نیرو به هنگام وقوع خرابی پیش‌رونده در سازه برخوردار نمی‌باشند. بدین ترتیب در روش تحلیل استاتیکی خطی، معیار پذیرش برای ارزیابی رفتار اعضای اصلی سازه‌های بتن مسلح در برابر خرابی پیش‌رونده معیار $DCR \leq 2$ معرفی می‌گردد. برای قاب ۳ طبقه مورد مطالعه

جدول ۶- حداکثر لنگر خمشی، لنگر پلاستیک و نسبت DCR نظیر المان‌های قاب سه طبقه (مدل آسیب‌دیده تحت سناریوی اول)

المان	M _{max}	N _{max}	M _p	DCR	المان	M _{max}	MP	DCR
C11	۰/۸۴	۲۷/۵۴	۴۶/۸۱	۰/۰۱۸	B11	۲۴/۹۸	۳۱/۰۳	۰/۸۰۵
C12	۵۰/۹۶	۲۸۰/۵۴	۴۸/۵۰	۱/۰۵۱	B12	۱۳۳/۲۷	۳۱/۰۳	۴/۲۹۵
C13	-----	-----	-----	-----	B13	۱۳۳/۲۷	۳۱/۰۳	۴/۲۹۵
C14	۵۰/۹۶	۲۸۰/۵۴	۴۸/۵۰	۱/۰۵۱	B14	۲۴/۹۸	۳۱/۰۳	۰/۸۰۵
C15	۰/۸۴	۲۷/۵۴	۴۶/۸۱	۰/۰۱۸				
C21	۳/۶۲	۱۷/۵۰	۲۴/۰۱	۰/۱۵۱	B21	۱۷/۷۱	۲۷/۰۸	۰/۶۵۴
C22	۵۷/۳۳	۱۸۱/۴۳	۲۸/۸۱	۱/۹۹	B22	۱۲۶/۳۸	۲۷/۰۸	۴/۶۶۷
C23	۰	۸/۷۸	۲۳/۰۸	۰	B23	۱۲۶/۳۸	۲۷/۰۸	۴/۶۶۷
C24	۵۷/۳۳	۱۸۱/۴۳	۲۸/۸۱	۱/۹۹	B24	۷۱،۱۷	۲۷/۰۸	۰/۶۵۴
C25	۳/۶۲	۱۷/۵۰	۲۴/۰۱	۰/۱۵۱				
C31	۲/۰۸	۶/۷۳	۲۲/۸۶	۰/۰۹۱	B31	۳۰/۰۲	۱۹/۷۴	۱/۵۲۱
C32	۸۱/۲۱	۸۹/۴۴	۲۸/۸۹	۲/۸۱۱	B32	۱۱۱/۲۳	۱۹/۷۴	۵/۶۳۵
C33	۰	۷/۱۱	۲۲/۹۰	۰	B33	۱۱۱/۲۳	۱۹/۷۴	۵/۶۳۵
C34	۸۱/۲۱	۸۹/۴۴	۲۸/۸۹	۲/۸۱۱	B34	۳۰/۰۲	۱۹/۷۴	۱/۵۲۱
C35	۲/۰۸	۶/۷۳	۲۲/۸۶	۰/۰۹۱				

جدول ۷- حداکثر لنگر خمشی، لنگر پلاستیک و نسبت DCR نظیر المان‌های قاب سه طبقه (مدل آسیب‌دیده تحت سناریوی دوم)

المان	M _{max}	N _{max}	M _p	DCR	المان	M _{max}	MP	DCR
C11	۲/۷۸	۳۳/۶۹	۴۷/۲۹	۰،۰۵۹	B11	۱۰/۶۹	۳۱/۰۳	۰/۳۴۵
C12	۲/۶۴	۱۴۳/۴۱	۵۳/۳۰	۰،۰۴۹	B12	۱۰/۷۲	۳۱/۰۳	۰/۳۴۵
C13	۰	۴۹/۴۰	۴۸/۴۹	۰	B13	۱۰/۷۲	۳۱/۰۳	۰/۳۴۵
C14	۲/۶۴	۱۴۳/۴۱	۵۳/۳۰	۰،۰۴۹	B14	۱۰/۶۹	۳۱/۰۳	۰/۳۴۵
C15	۲/۷۸	۳۳/۶۹	۴۷/۲۹	۰،۰۵۹				
C21	۸/۲۷	۱۹/۵۴	۲۴/۲۲	۰،۳۴۱	B21	۱۱/۱۴	۲۷/۰۸	۰/۴۱۱
C22	۱۴/۳۶	۱۱۷/۲۰	۲۹/۸۰	۰،۴۸۲	B22	۱۴/۴۱	۲۷/۰۸	۰/۵۳۲
C23	۰	۲۲/۲۳	۲۴/۴۱	۰	B23	۱۴/۴۱	۲۷/۰۸	۰/۵۳۲
C24	۱۴/۳۶	۱۱۷/۲۰	۲۹/۸۰	۰،۴۸۲	B24	۱۱/۱۴	۲۷/۰۸	۰/۴۱۱
C25	۸/۲۷	۱۹/۵۴	۲۴/۲۲	۰،۳۴۱				
C31	۲/۸۶	۵/۰۷	۲۲/۶۸	۰،۱۲۶	B31	۳۵/۸۹	۱۹/۷۴	۱/۸۱۸
C32	۷۶/۹۰	۹۲/۲۹	۲۸/۹۹	۲،۶۵۳	B32	۱۱۲/۷۹	۱۹/۷۴	۵/۷۱۴
C33	-----	-----	-----	-----	B33	۱۱۲/۷۹	۱۹/۷۴	۵/۷۱۴
C34	۷۶/۹۰	۹۲/۲۹	۲۸/۹۹	۲،۶۵۳	B34	۳۵/۸۹	۱۹/۷۴	۱/۸۱۸
C35	۲/۸۶	۵/۰۷	۲۲/۶۸	۰،۱۲۶				

۲ تجاوز نموده است در حالی که در سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه آخر ضریب DCR نظیر ۴ المان (مشمول بر ۲ المان تیر و ۲ المان ستون) از عدد ۲ تجاوز می‌نماید. این نتیجه ضمن آن که

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای قاب سه طبقه مورد مطالعه در سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه همکف ضریب DCR نظیر ۸ المان (مشمول بر ۶ المان تیر و ۲ المان ستون) از عدد

است، در حالی که ضریب DCR نظیر برخی از ستون‌ها دچار کاهش گردیده است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده آن است که تیرهای طبقه فوقانی در هر سناریوی خرابی از بالاترین پتانسیل آسیب‌پذیری برخوردار می‌باشد که این موضوع می‌تواند در تقویت سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده مدنظر واقع شود.

	0.501 1.287	0.479 4.730	0.479 4.730	0.501 1.287
0.327 0.123	0.017 2.377	0.000 0.000	0.017 2.377	0.327 0.123
	0.361 0.585	0.361 3.884	0.361 3.884	0.361 0.585
0.151 0.183	0.006 1.274	0.000 0.000	0.006 1.274	0.151 0.183
	0.287 0.497	0.287 3.612	0.287 3.612	0.287 0.497
0.166 0.132	0.002 1.394	0.000 0.000	0.002 1.394	0.166 0.132
	0.284 0.386	0.286 3.737	0.286 3.737	0.284 0.386
0.122 0.105	0.002 1.623	0.000 0.000	0.002 1.623	0.122 0.105
	0.260 0.645	0.256 4.771	0.256 4.771	0.260 0.645
0.070 0.020	0.001 1.065	0.000 -----	0.001 1.065	0.070 0.020

	0.501 1.805	0.479 5.713	0.479 5.713	0.501 1.805
0.327 0.141	0.017 2.660	0.000 -----	0.017 2.660	0.327 0.141
	0.361 0.421	0.361 0.522	0.361 0.522	0.361 0.421
0.151 0.338	0.006 0.486	0.000 0.000	0.006 0.486	0.151 0.338
	0.287 0.291	0.287 0.320	0.287 0.320	0.287 0.291
0.166 0.135	0.002 0.075	0.000 0.000	0.002 0.075	0.166 0.135
	0.284 0.290	0.286 0.298	0.286 0.298	0.284 0.290
0.122 0.137	0.002 0.015	0.000 0.000	0.002 0.015	0.122 0.137
	0.260 0.252	0.256 0.266	0.256 0.266	0.260 0.252
0.070 0.071	0.001 0.001	0.000 0.000	0.001 0.001	0.070 0.071

شکل ۵- پارامتر DCR نظیر سازه اصلی و سازه آسیب‌دیده قاب ۵ طبقه تحت هر دو سناریوی خرابی

	0.488 1.106	0.477 4.197	0.477 4.197	0.488 1.106
0.404 0.240	0.010 2.446	0.000 0.000	0.010 2.446	0.404 0.240
	0.411 0.549	0.401 3.528	0.401 3.528	0.411 0.549
0.191 0.255	0.012 1.304	0.000 0.000	0.012 1.304	0.191 0.255
	0.311 0.461	0.317 3.265	0.317 3.265	0.311 0.461
0.182 0.165	0.002 1.353	0.000 0.000	0.002 1.353	0.182 0.165
	0.282 0.360	0.285 3.018	0.285 3.018	0.282 0.360
0.143 0.155	0.004 1.521	0.000 0.000	0.004 1.521	0.143 0.155
	0.222 0.421	0.227 3.245	0.227 3.245	0.222 0.421
0.120 0.102	0.002 1.650	0.000 0.000	0.002 1.650	0.120 0.102
	0.223 0.363	0.227 3.368	0.227 3.368	0.223 0.363
0.097 0.076	0.001 2.301	0.000 0.000	0.001 2.301	0.097 0.076
	0.233 0.719	0.232 5.139	0.232 5.139	0.233 0.719
0.066 0.002	0.000 1.336	0.000 -----	0.000 1.366	0.066 0.002

	0.488 1.781	0.477 5.711	0.477 5.711	0.488 1.781
0.404 0.188	0.010 2.978	0.000 -----	0.010 2.978	0.404 0.188
	0.411 0.515	0.401 4.801	0.401 4.801	0.411 0.515
0.191 0.417	0.012 1.537	0.000 0.000	0.012 1.537	0.191 0.417
	0.311 0.338	0.317 0.370	0.317 0.370	0.311 0.338
0.182 0.167	0.002 0.081	0.000 0.000	0.002 0.081	0.182 0.167
	0.282 0.301	0.285 0.309	0.285 0.309	0.282 0.301
0.143 0.166	0.004 0.014	0.000 0.000	0.004 0.014	0.143 0.166
	0.222 0.239	0.227 0.250	0.227 0.250	0.222 0.239
0.120 0.128	0.002 0.002	0.000 0.000	0.002 0.002	0.120 0.128
	0.223 0.232	0.227 0.241	0.227 0.241	0.223 0.232
0.097 0.102	0.001 0.001	0.000 0.000	0.001 0.001	0.097 0.102
	0.233 0.225	0.232 0.242	0.232 0.242	0.233 0.225
0.066 0.069	0.000 0.001	0.000 0.000	0.000 0.001	0.066 0.069

شکل ۶- پارامتر DCR نظیر سازه اصلی و سازه آسیب‌دیده قاب ۷ طبقه تحت هر دو سناریوی خرابی

سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه همکف علاوه بر ستون‌های میانی طبقه آخر ستون‌های میانی طبقه اول نیز رفتار آسیب‌پذیری از خود نشان داده‌اند. در خصوص المان تیرها در هر دو قاب ۵ و ۷ طبقه برای سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه همکف کلیه تیرهای نظیر دهانه‌های میانی در تمام طبقات رفتار آسیب‌پذیری از خود نشان داده‌اند در حالی که برای سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه آخر در قاب ۵ طبقه تنها تیرهای نظیر دهانه‌های میانی طبقه آخر ولی در قاب ۷ طبقه علاوه بر تیرهای دهانه‌های میانی طبقه آخر، تیرهای نظیر دهانه‌های میانی طبقه اول نیز دارای

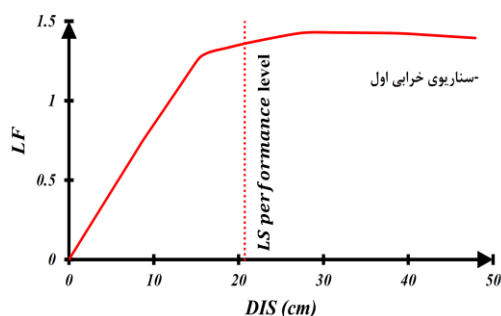
نشان‌دهنده آسیب‌پذیری قاب‌های بتن مسلح طراحی شده بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان در برابر خرابی پیش‌رونده می‌باشد، معرف پتانسیل آسیب‌پذیری بالاتر قاب در نتیجه سناریوی خرابی حذف ستون طبقه همکف در مقایسه با سناریوی خرابی حذف ستون طبقه آخر می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر این‌که در هر دو سناریوی خرابی ضریب DCR نظیر کلیه تیرها دچار افزایش شده

نتایج DCR به‌دست‌آمده برای قاب‌های ۵ و ۷ طبقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که قاب‌های ۵ و ۷ طبقه نیز همانند قاب ۳ طبقه در برابر خرابی پیش‌رونده آسیب‌پذیر می‌باشند. در قاب ۵ طبقه برای هر دو سناریوی خرابی مورد مطالعه المان ستون‌های آسیب‌پذیر در برابر خرابی پیش‌رونده مشترک بوده و شامل ستون‌های داخلی نظیر طبقه آخر می‌باشد. در حالی که المان ستون‌های قاب ۷ طبقه در برابر سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه همکف رفتار آسیب‌پذیرتری در مقایسه با سناریوی حذف ستون میانی طبقه فوقانی از خود نشان می‌دهند، به‌گونه‌ای که در قاب ۷ طبقه برای

پتانسیل آسیب پذیری در برابر خرابی پیش رونده می باشد. همچنین با توجه به آسیب پذیری تعداد بیشتری از تیرها در مقایسه با ستون ها که تامین کننده پایداری کلی سازه می باشند می توان چنین اظهار نظر نمود که تحت خرابی پیش رونده ناشی از حذف ستون وقوع ناپایداری موضعی در نتیجه آسیب پذیری تعداد زیاد تیرها از گستردگی و شدت بالاتری در مقایسه با ناپایداری کلی سازه که متأثر از رفتار و عملکرد ستون هاست، برخوردار می باشد.

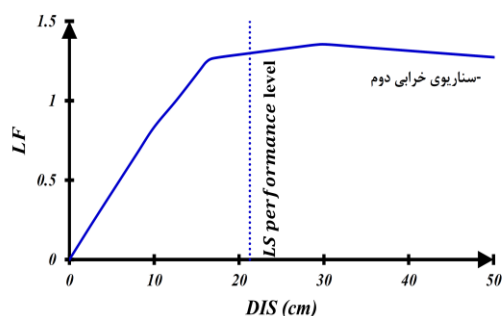
جدول ۸- تعداد المان های آسیب پذیر قاب ها تحت سناریوهای خرابی مورد بررسی

قاب	سناریوی خرابی اول		سناریوی خرابی دوم	
	المان تیر	المان ستون	المان تیر	المان ستون
3S	۶	۲	۲	۲
5S	۱۰	۲	۲	۲
7S	۱۴	۴	۴	۲

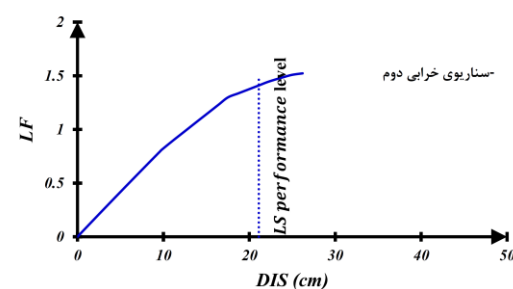
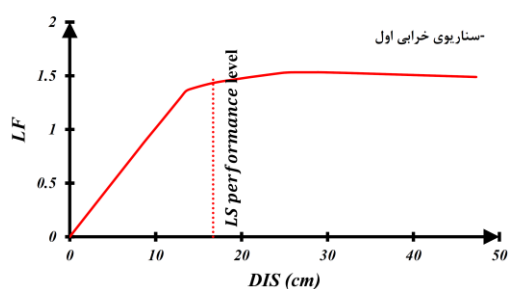


پتانسیل آسیب پذیری در برابر خرابی پیش رونده می باشد. همچنین نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که برای هر دو سناریوی خرابی در همه قاب های مورد مطالعه ضریب DCR نظیر کلیه تیرها نسبت به حالت اولیه (سازه آسیب ندیده) افزایش یافته است در حالی که ضریب DCR نظیر ستون ها در برخی از المان ها در نتیجه وقوع خرابی پیش رونده دچار کاهش گردیده است.

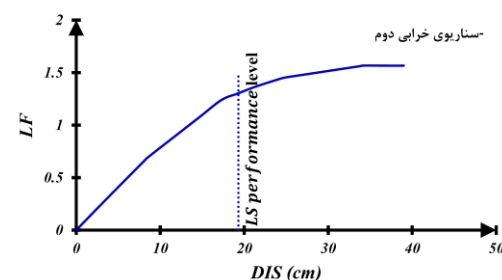
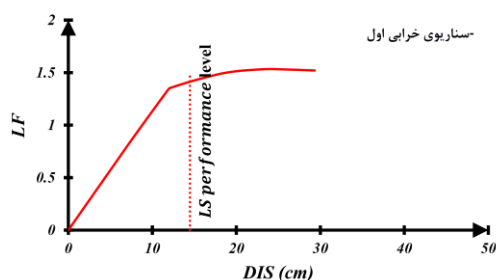
گزارش کلی تعداد المان های آسیب پذیر هر یک از قاب های ۳، ۵ و ۷ طبقه در برابر خرابی پیش رونده تحت سناریوهای خرابی مورد بررسی در جدول (۸) ارائه شده است که بر اساس آن مشخص است میزان آسیب پذیری سازه های مورد مطالعه در برابر سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه همکف در مقایسه با آسیب پذیری ناشی از سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه فوقانی بالاتر می باشد و به علاوه تعداد المان بیشتری از تیرها در مقایسه با المان ستون ها دارای



شکل ۷- نمودار ضریب بار - جابجایی قاب ۳ طبقه برای سناریوهای خرابی مورد مطالعه



شکل ۸- نمودار ضریب بار - جابجایی قاب ۵ طبقه برای سناریوهای خرابی مورد مطالعه



شکل ۹- نمودار ضریب بار - جابجایی قاب ۷ طبقه برای سناریوهای خرابی مورد مطالعه

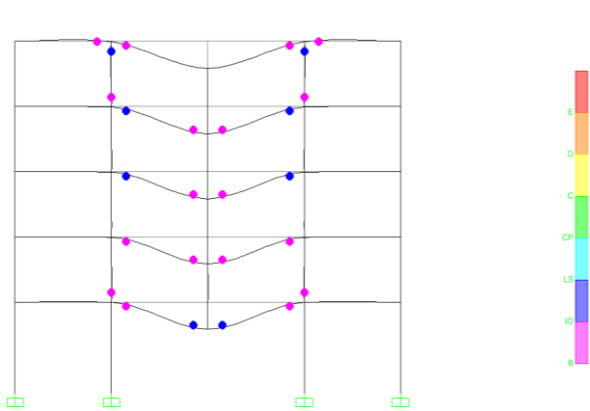
۴-۲- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی

روش تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌ها به‌طور کلی به دو روش کنترل نیرو و کنترل تغییرمکان قابل انجام می‌باشد که در این تحقیق تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب‌های مورد مطالعه بر اساس روش کنترل تغییرمکان انجام شده است. در این روش با انتخاب گره فوقانی ستون حذف‌شده به‌عنوان نقطه کنترل، الگوی بارگذاری ثقلی متناظر نشان‌داده‌شده در اشکال (۲) و (۴) طی گام‌های متوالی تحلیل به تدریج افزوده می‌گردد. این افزایش تدریجی الگوی بار تا حدی ادامه می‌یابد که یا سازه دچار ناپایداری کامل گردد و یا این که مقدار تغییر مکان نظیر نقطه کنترل به مقدار تغییرمکان هدف برسد. در این تحقیق مقدار تغییرمکان هدف به گونه‌ای تنظیم و انتخاب گردیده است که سازه لزوماً وارد مرحله رفتار غیرخطی خود شده و به علاوه عملکرد سازه از سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) که سطح عملکرد مورد انتظار از قاب‌های مورد مطالعه می‌باشد، عبور نماید. پس از تکمیل تحلیل استاتیکی غیرخطی هر یک از قاب‌ها تحت دو سناریوی خرابی مورد مطالعه نمودار تغییرمکان نظیر نقطه کنترل در برابر پارامتر ضریب بار (LF) ترسیم گردیده است. بر اساس نمودار مزبور چنانچه مقدار پارامتر LF در تغییرمکان نظیر سطح عملکرد LS سازه برابر و یا کمتر از واحد باشد معرف آسیب‌پذیری سازه در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از سناریوی خرابی متناظر می‌باشد و در غیر این صورت عملکرد سازه در برابر خرابی پیش‌رونده ایمن و مقاوم شناخته می‌شود. پارامتر LF معرف نسبت بارهای ثقلی وارده و قابل تحمل توسط سازه در هر گام تحلیلی به بار ثقلی نظیر ترکیب بارگذاری $\Omega_{NLS}(DL + 0.5LL)$ می‌باشد. نتایج نظیر تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب‌های مورد مطالعه در شکل‌های (۷) الی (۹) نشان داده شده است.

بر اساس نمودارهای نشان‌داده‌شده در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) مشخص می‌گردد که ضریب بار نظیر سطح عملکرد ایمنی جانی در کلیه قاب‌های مورد مطالعه تحت هر دو سناریوی خرابی مورد بررسی بزرگ‌تر از واحد می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده عدم آسیب‌پذیری قاب‌های خمشی بتنی ویژه ۳، ۵ و ۷ طبقه مورد مطالعه در این تحقیق در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از سناریوهای خرابی حذف ستون میانی طبقه همکف و حذف ستون میانی طبقه آخر می‌باشد. مطابق ضوابط دستورالعمل DOD، نتایج حاصل از روش تحلیل استاتیکی خطی به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده محافظه‌کارانه می‌باشد که بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق و اختلاف موجود در نتایج نظیر تحلیل استاتیکی خطی و

استاتیکی غیرخطی محافظه‌کارانه بودن به‌کارگیری روش تحلیل استاتیکی خطی به‌منظور برآورد پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بتن مسلح اثبات می‌گردد.

با وجود نتایج متفاوت به‌دست‌آمده برای پتانسیل خرابی پیش‌رونده قاب‌های مورد مطالعه بر اساس روش‌های تحلیل استاتیکی خطی و غیرخطی، بررسی دقیق نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اکثریت قریب به اتفاق المان‌هایی که در روش تحلیل استاتیکی خطی دارای DCR بزرگ‌تر از ۲ هستند، در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی نیز دچار جاری‌شدگی شده و محل تشکیل مفاصل پلاستیک می‌باشند. این تناظر و تشابه موجود ضمن تایید صحت نتایج به‌دست‌آمده و دقت به‌کار رفته در هر یک از روش‌های تحلیلی، محافظه‌کارانه بودن نتایج تحلیل استاتیکی خطی و دقت و قابلیت بالای روش تحلیل استاتیکی غیرخطی در برآورد آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده را نیز نشان می‌دهد. به عنوان نمونه مفاصل پلاستیک تشکیل‌شده نظیر سطح عملکرد LS در قاب ۵ طبقه برای حالت سناریوی خرابی حذف ستون میانی طبقه همکف در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- وضعیت تشکیل مفاصل پلاستیک نظیر سطح عملکرد LS در قاب ۵ طبقه تحت سناریوی خرابی اول

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، پتانسیل خرابی پیش‌رونده قاب‌های خمشی بتن مسلح ویژه طراحی‌شده بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۷ تحت دو سناریوی خرابی و با استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی خطی و استاتیکی غیرخطی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. اهم نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

2. GSA, "Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects," The U.S. General Services Administration, 2003.
 3. Department of Defense, "Unified Facilities Criteria," Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, UFC 4-023-03, Washington, DC, USA, 2009.
 4. J. Kim and T. Kim, "Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames," Journal of Constructional Steel Research, vol. 65. no. 1, pp. 169 – 179, 2009.
 5. G. Powell, "Progressive collapse: Case study using nonlinear analysis," Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium, New York, pp. 2185–2198, 2005.
 6. S. El-Tawil, S. Kunnath, and H. S. Lew, "Macro Models for Progressive Collapse Analysis of Steel Moment Frame Buildings," University of Michigan, 2007.
 7. B. Yihai, "Macro model-Based Progressive Collapse Simulation of Reinforced Concrete Structures," University of California, 2008.
 8. H. Helmy, H. Salem, and S. Mourad, "Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method," Engineering Structures, vol. 42, pp. 127-141, 2012.
 9. S. M. Zahrai and A. R. Ezoddin, "Numerical Study of Progressive Collapse in Intermediate Moment Resisting Reinforced Concrete Frame Due to Column Removal," Civil Engineering Infrastructures Journal, vol. 47, no. 1, pp. 71-88, 2014.
 10. M. Liu, "A New Dynamic Increase Factor for Nonlinear Static Alternate Path Analysis of Building Frames against Progressive Collapse," Engineering Structures, vol. 48, pp. 666-673, 2013.
 11. M. Ferraioli, A. M. Avossa and A. Mandara, "Assessment of Progressive Collapse Capacity of Earthquake-Resistant Steel Moment Frames Using Pushdown Analysis," The Open Construction and Building Technology Journal, vol. 8, pp. 324-336, 2014.
 12. S. Karimiyan¹, A. S. Moghadam¹, A. Husseinzadeh, and M. Karimiyan, "Progressive collapse evaluation of RC symmetric and asymmetric midrise and tall buildings under earthquake loads," International Journal of Civil Engineering, Transaction A: Civil Engineering, vol. 13, no. 1, 2015.
 13. T. A. Sakr, "progressive collapse analysis of reinforced concrete buildings including soil-structure interaction," International Journal of Civil and Structural Engineering Research, vol. 3, Issue 1, pp. 42-56, 2015.
 14. H. R. Tavakoli and A. Rashidi, "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Multi-Story Moment Resisting Steel Frame Buildings Under Lateral Loading," Scientia Iranica, vol. 20, no. 1, pp. 77-86, 2013.
 15. S1. Karuna and S. Yashaswini, "Assessment of Progressive Collapse on a Reinforced Concrete Framed Building."
- ✓ بر اساس نتایج حاصل از روش تحلیل استاتیکی خطی کلیه قاب‌های مورد مطالعه تحت سناریوهای خرابی پیش‌رونده مورد بررسی آسیب‌پذیر می‌باشند.
- ✓ بر اساس نتایج حاصل از روش تحلیل استاتیکی خطی کلیه قاب‌های مورد مطالعه تحت سناریوی خرابی حذف ستون میانی در طبقه همکف دارای پتانسیل خرابی پیش‌رونده بالاتری در مقایسه با سناریوی خرابی حذف ستون میانی در طبقه آخر می‌باشند.
- ✓ تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از هر یک از سناریوهای خرابی، در مقایسه با ستون‌ها تعداد المان‌های تیر بیشتری آسیب‌پذیر می‌باشند.
- ✓ تیرهای بالاترین طبقه در هریک از سناریوهای خرابی مورد مطالعه از بالاترین پتانسیل آسیب‌پذیری برخوردار می‌باشد که این موضوع می‌بایست در تقویت سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده مدنظر واقع شود.
- ✓ بر اساس نتایج حاصل از روش تحلیل غیرخطی استاتیکی؛ کلیه قاب‌های مورد مطالعه تحت سناریوهای خرابی پیش‌رونده مورد بررسی مقاوم و ایمن می‌باشند.
- ✓ ضریب DCR نظیر المان تیرها با وقوع خرابی پیش‌رونده در کلیه تیرها افزایش می‌یابد در حالی که در خصوص ستون‌ها چنین روندی حاکم نبوده بلکه در برخی از المان ستون‌ها در نتیجه وقوع خرابی پیش‌رونده با کاهش DCR مواجه هستیم.
- ✓ اکثریت قریب به اتفاق المان‌هایی که در روش تحلیل استاتیکی خطی دارای DCR بزرگتر از ۲ می‌باشند در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی نیز دچار جاری‌شدگی و محل تشکیل مفصل پلاستیک می‌باشند.
- ✓ نتایج حاصل از روش تحلیل استاتیکی خطی قاب‌های خمشی بتن مسلح ویژه بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد.
- ✓ نتایج حاصل از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی در مقایسه با نتایج حاصل از روش تحلیل استاتیکی خطی از دقت و اعتبار بالاتری برخوردار می‌باشد.

۶- منابع

1. H. Griffiths, A. Pugsley, and O. Saunders, "Report of Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point," Canning Town. London: Ministry of Housing and Local Government, Her Majesty's Stationary Office, 1968.

۱۸. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان، ۱۳۹۲.
۱۹. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث نهم، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه، ۱۳۹۲.
20. "American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, 2016.
- International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 5, Issue 6, 2015.
16. Choubey¹ and M. D. Goel, "Progressive Collapse Analysis of RCC Structures," International Journal of Optimization in Civil Engineering, Int. J. Optim. Civil Eng., vol. 6, no. 2, pp. 287-301, 2016.
۱۷. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش ۴)، ۱۳۹۳.

Study of Progressive Collapse in Reinforced Concrete Special Moment Resisting Frames Due to the Sudden Removal of Columns

B. Badarloo*

Abstract

One of the important issues in passive defense considerations is progressive collapse. Progressive collapse of the structure occurs when the major structural load carrying members are removed suddenly and the remaining structural elements are not capable of supporting the weight of the building and eventually result in collapse and failure of the structure. The main purpose of this investigation is assessment of the progressive collapse capacity of reinforced concrete special moment frame that is designed according to Iranian National Building Code (part 9). In this paper, two methods of analysis, nonlinear static analysis (pushdown analysis) and linear static analysis, are used for evaluating the progressive collapse capacity of special moment resisting frames with 3, 5 and 7 stories under two different scenarios. The Progressive collapse potential of SMRFs is evaluated based on the acceptance criteria of the last edition of UFC 4-023-03 document. The results show that the linear static analysis procedure has more conservative results compared to the pushdown analysis and the beam elements are also more vulnerable to progressive collapse than column elements.

Key Words: *Progressive Collapse, Special Moment Resisting Reinforced Concrete Frame, Push-Down, Nonlinear Analysis, Static Analysis*

* Qom University of Technology - (badarloo@qut.ac.ir) - Writer-in-Charge