

بررسی اثر تیر طره در خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتن آرمه با سیستم مقاوم دوگانه

سیده مرضیه قیامی تکلیمی

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

علی خیرالدین *

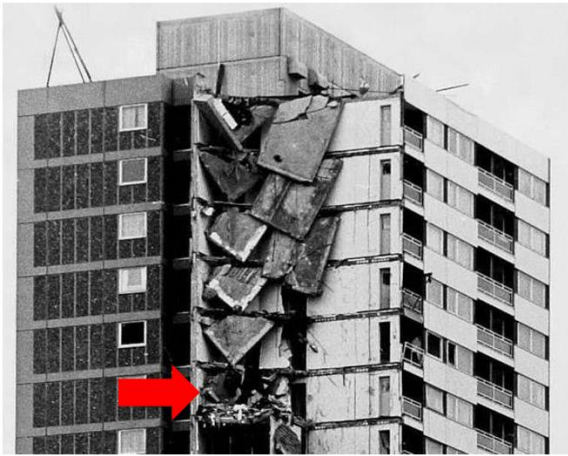
استاد ممتاز گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

از مهم‌ترین مسائل پدافند غیر عامل در سازه‌ها، موضوع خرابی پیش‌رونده می‌باشد. خرابی پیش‌رونده در اثر حوادث عمدی، نظامی، تروریستی، زلزله و سیل اتفاق می‌افتد. در خرابی پیش‌رونده، در اثر تخریب یک عضو سازه‌ای، خرابی به دیگر اعضای سازه منتقل شده و خرابی به صورت زنجیره‌ای در کل سازه گسترش می‌یابد و باعث تخریب بخش و یا کل سازه می‌گردد. تعیین المان کلیدی و تقویت آن می‌تواند از خرابی پیش‌رونده، تخریب کلی سازه و خسارات ناشی از آن جلوگیری کند. در این مقاله سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم دوگانه و تیر طره انتخاب شده است. به منظور بررسی اثر تیر طره بر خرابی پیش‌رونده و تعیین المان کلیدی در سازه‌های بتن آرمه با سیستم دوگانه از روش شاخص حساسیت و تحلیل سازه‌ها، با تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشده قائم (Push Down Analysis) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در ساختمان‌های بتن آرمه با سیستم دوگانه با تیر طره، شاخص خرابی ستون با بیشترین فاصله از تیر طره (۲۳ متر) نسبت به سایر ستون‌ها در هر سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۰.۸۷٪، ۰.۷۷٪ و ۰.۶۶٪ می‌باشد که به عنوان المان کلیدی در این سازه‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج در صورت افزایش ۳ برابری ارتفاع سازه دارای تیر طره با سیستم مقاوم دوگانه از ۲۰ متر (۵ طبقه) به ۶۰ متر (۱۵ طبقه)، شاخص خرابی کل سازه از ۰.۸۷٪ به ۰.۶۶٪ کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر سازه با افزایش ارتفاع در خرابی پیش‌رونده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خرابی پیش‌رونده، تحلیل استاتیکی غیرخطی، شاخص حساسیت، المان کلیدی، تیر طره.

۱- مقدمه



شکل ۱- خرابی پیش‌رونده ساختمان Ronan Point سال ۱۹۶۸

یکی دیگر از تخریب‌های پیش‌رونده بزرگ و قابل تأمل که به‌طور عمدی رخ داده است و باعث توجه بیشتری به موضوع پدیده خرابی پیش‌رونده شده است، تخریب برج‌های مرکز تجارت جهانی (WTC) در سال ۲۰۰۱ می‌باشد. تخریب این برج‌ها به‌صورت برخورد هواپیمای بوئینگ ۷۶۷ و در نتیجه انفجار طبقات بالایی سازه می‌باشد که در نتیجه تخریب پیش‌رونده رخ داده است. در هنگام برخورد طبقات بالایی به دلیل ضربه بسیار شدیدی که به سازه وارد شده بود دچار تخریب و آتش‌سوزی شد که همین امر سبب تخریب طبقات بالاتر و ایجاد آوار بر روی طبقات پایینی گردید که باعث به‌وجود آمدن تخریب پیش‌رونده در طبقات پایینی و به سمت پایین سازه شده است. در تمام این سه حادثه بزرگ می‌توان تأثیر حذف یک یا چند عضو از اعضای سازه‌ای که نقش مهمی در پایداری کلی سازه دارند را مشاهده نمود. در این حادثه‌ها، تخریب در یک یا چند عضو ایجاد شد و به دیگر اعضا و بخش‌های سازه گسترش یافت و در نهایت منجر به تخریب بخش وسیعی از سازه و یا کل سازه گردید.

افزایش درجه نامعینی سازه در طراحی‌ها، به جهت افزایش مقاومت و پایداری سازه در برابر تخریب پیش‌رونده برای ایجاد مسیرهای جایگزین بار (Alternate Load Path-ALP) اهمیت بالایی دارد. به‌طور کلی سازه‌های دارای درجه نامعینی بالا، در تخریب اولیه پایداری و استحکام خود را حفظ می‌کنند و سازه‌هایی که ساختار ضعیف‌تری دارند مانند سازه‌های دارای دال‌های بتنی پیش‌ساخته که درجه نامعینی پایین‌تری دارند، در خرابی پیش‌رونده عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهند زیرا شکل‌پذیری و پیوستگی مناسبی ندارند. یکی از عوامل مهم در تخریب سازه‌ها عملکرد

خرابی پیش‌رونده از تخریب اولیه یک عضو اصلی سازه شروع می‌شود که ممکن است باعث تخریب بخش بزرگی از سازه و یا کل سازه می‌گردد. برای در نظر گرفتن خرابی سازه باید سه شرط: (۱) خرابی اولیه به صورت موضعی باشد. (۲) خرابی باید به نوعی به سایر اعضای سازه گسترش یابد. (۳) حالت خرابی نهایی باید به نوعی متفاوت با خرابی اولیه باشد و بخش بزرگ‌تری از سازه تخریب شود [۱]. در سال ۱۹۶۸ بعد از تخریب بخشی از ساختمان ۲۲ طبقه رونان پوینت (Ronan Point) که دارای سیستم پیش‌ساخته و دیوارهای باربر بتنی بود (شکل ۱)، در انگلستان بحث خرابی پیش‌رونده مطرح گردید و مفهوم مسیر جایگزین بار (Alternate Load Path-ALP) و حذف ستون‌های اصلی توسعه یافت که از آن زمان تا کنون مطالعات گسترده‌ای در این خصوص انجام شده است [۲]، [۳]. این ساختمان در اثر انفجار گاز طبیعی تخریب شده است که انفجار گاز باعث تخریب دیوارهای خارجی به بیرون و پائل پیش‌ساخته در اثر انفجار جابه‌جا شده بود. به‌دلیل عدم مهار مناسب بین اعضای سازه در این ساختمان، شکست چشمه در کل سازه گسترش یافته و سبب تخریب گوشه ساختمان شده است.

پس از تخریب ساختمان رونان، برخی کشورها از جمله انگلستان و کانادا استانداردهای نظارتی را برای مقابله با پیشگیری از خرابی پیش‌رونده ارائه کردند. در این استانداردها، مقررات الزام می‌کند که ساختمان‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده با مهار کردن اعضای سازه، افزودن المان‌های اضافی و تامین مقاومت کافی برای مقاومت در برابر بارهای غیر طبیعی، طراحی شوند. با توجه به این استانداردها و الزامات آن‌ها، ساخت سازه‌های مقاوم‌تر در نظر گرفته شده است یعنی سازه‌های مقاوم‌تر، قابل انعطاف‌تر و دارای قابلیت توزیع مجدد بارها بین اعضا، طراحی و ساخته شود.

یکی از تخریب‌های پیش‌رونده در اثر بمب‌گذاری و به صورت عمدی، انفجار ساختمان فدرال مورا در اوکلاهاما در سال ۱۹۹۵ می‌باشد. انفجار بمب در این ساختمان سبب تخریب سه ستون اصلی و پیرامونی سازه شد که در نتیجه تخریب این ستون‌ها، تخریب‌های زنجیره‌ای در کل سازه به‌وجود آمد. تیر متصل به ستون‌های تخریب شده، آسیب دید و منهدم شد و به دنبال این تخریب‌ها کف‌های سازه به صورت پیش‌رونده تخریب شدند.

بر خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بتنی پرداخته شده است [۱۶].

[۱۷]. در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای بر روی پلان L شکل سازه قاب خمشی فولادی انجام شده است. در این مطالعه تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی سازه انجام شده که با توجه به نتایج به دست آمده شاخص حساسیت، مشخص شد که در سازه‌های قاب خمشی فولادی با پلان L شکل، حذف ستون در مرکز پلان وضعیت بحرانی در تخریب پیش‌رونده ایجاد می‌کند [۱۸].

همچنین نتایج به دست آمده در مطالعه‌ای دیگر بر روی پلان L شکل در سازه بتن آرمه نشان می‌دهد ستون‌های گوشه سازه L شکل بیشترین پتانسیل خرابی را در تخریب پیش‌رونده دارند [۱۹].

در سال ۲۰۱۹ مطالعه‌ای بر روی قاب خمشی بتن مسلح با روش مسیر بار جایگزین و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش تعداد دهانه‌ها و مسیرهای جایگزین بار، مقاوم‌سازی عضو کلیدی قاب و ستون‌های گوشه و منظم بودن هندسه سازه از جمله راه‌حل‌های کاهش خطر تخریب پیش‌رونده در قاب‌های خمشی بتن مسلح می‌باشد [۲۰].

در سال ۲۰۲۲ مطالعه آزمایشگاهی و عددی بر روی مقاومت قاب-های RC در تخریب پیش‌رونده با در نظر گرفتن اثرات دال و تیر انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده نشان داد که ظرفیت باربری سیستم تیر عرضی در مرحله فشاری اصلی، تقریباً با مجموع ظرفیت‌های باربری دو تیر متقاطع برابر است. در حالی که با در نظر گرفتن اثرات تیر عرضی و دال، می‌توان ظرفیت باربری یک تیر دو دهانه را به اندازه ۳۴۰٪ افزایش داد. بنابراین اثرات تیر عرضی و دال را نباید در شبیه‌سازی انهدام پیش‌رونده برای سازه-های قاب خمشی RC نادیده گرفت [۲۱].

بررسی آزمایشگاهی و عددی خرابی پیش‌رونده دینامیکی مجموعه تیر و ستون RC تحت سناریو حذف ستون میانی در سال ۲۰۲۲ انجام شده است [۲۲].

در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای بر روی خرابی یک سازه نامنظم چند طبقه در انهدام پیش‌رونده انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد اعضای اطراف ستون حذف شده با DCR (نسبت ظرفیت به تقاضا) ۱/۵ شکسته و دچار انهدام شده‌اند. همچنین حذف ستون داخلی در پلان نسبت به حذف سایر ستون‌ها منجر به شکست بیشتر عناصر می‌شود. خرابی المان‌ها در مدل‌هایی که دارای نامنظمی سختی هستند بیشتر از سازه‌های بدون نامنظمی می‌باشند و این امر بیانگر

زنجره‌ای می‌باشد [۴]. در سال ۲۰۱۵ مطالعه‌ای بر روی مقاومت یک سازه فولادی معمولی و دال‌های آن در برابر خرابی پیش‌رونده با حذف یک ستون مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از کابل‌های فولادی در دال‌های سازه‌های فولادی می‌تواند هم صرفه اقتصادی داشته باشد و هم از تخریب پیش‌رونده سازه فولادی جلوگیری نماید. همچنین براساس نتایج این مطالعه می‌توان سازه‌های موجود را مقاوم سازی کرد. سیستم مقاوم سازی متشکل از کابل‌های فولادی می‌باشد که در کنار تیرهای فولادی قرار گرفته‌اند و می‌تواند به هنگام حذف یک ستون تأثیر قابل توجهی در کنترل تخریب پیش‌رونده داشته باشند [۵].

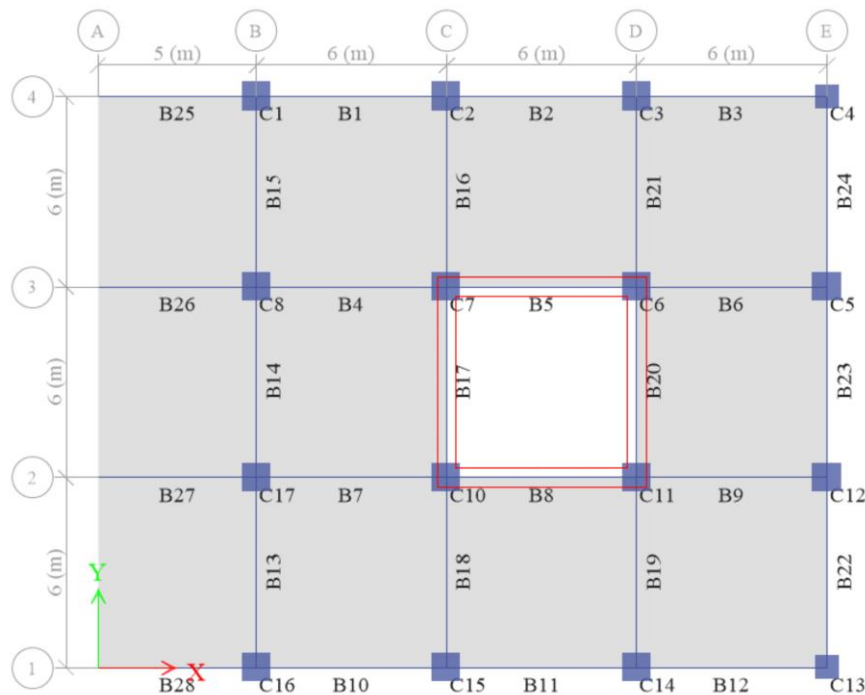
در تجزیه و تحلیل‌های تخریب پیش‌رونده از مسیر بار جایگزین استفاده می‌شود. این روش، یک روش مستقل از عامل تخریب (تهدید سازه) می‌باشد بدین معنا که علت تخریب را در نظر نمی‌گیرد و فقط به عملکرد سازه بعد از تخریب اولیه در یک یا چند المان می‌پردازد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی تخریب پیش‌رونده به دلیل حوادثی از جمله انفجار [۶]-[۸]، ضربه [۹]، آتش‌سوزی [۱۰] و بارهای ناشی از زلزله [۱۱]، [۱۲] انجام شده است. تجزیه و تحلیل تخریب پیش‌رونده براساس روش مسیر جایگزین (Alternate Path Method-APM) می‌تواند به دو صورت دینامیکی و استاتیکی انجام شود [۱۳]. در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای بر روی قاب دو بعدی که با روش استاتیکی خطی و دینامیکی غیرخطی تحلیل شده بود، انجام شده است. براساس نتایج، طراحی قاب‌های خمشی در برابر بارهای جانبی، در خرابی پیش‌رونده، کمترین آسیب را دارند. اگر ستون گوشه در پلان این سازه‌ها حذف شود، پتانسیل خرابی بیشتری دارد و احتمال تخریب پیش‌رونده با افزایش تعداد طبقات کاهش می‌یابد [۱۴]. در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای بر روی ۴۶ مدل سازه فولادی منطبق بر آیین‌نامه-های ایران با هدف بررسی تخریب پیش‌رونده و پتانسیل پیش‌رونده در این سازه‌ها، انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد تمام مدل‌های مورد بررسی دارای پتانسیل خرابی می‌باشند و موقعیت قرارگیری المان در تخریب پیش‌رونده موثر است. بر همین اساس ضروری است این بحث در آیین‌نامه‌های ایران لحاظ شود [۱۵]. در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ بررسی عددی تخریب پیش‌رونده در سازه‌های بتن آرمه انجام شده است. همچنین در این مطالعات به بررسی حذف ستون در موقعیت‌های مختلف و تأثیر آن

آن است که در سازه‌های دارای نامنظمی در خرابی پیش‌رونده آسیب بیشتری ایجاد می‌شود [۲۳]. در پژوهش حاضر چگونگی وقوع خرابی پیش‌رونده در سازه با سیستم دوگانه قاب خمشی بتن آرمه متوسط و دیوار برشی بتن آرمه ویژه (هسته مرکزی با دیوار برشی توپر بتنی) به همراه تیر طره بزرگ در یک سمت سازه به منظور بررسی عملکرد سازه‌های مورد نظر در موقعیت‌های مختلف حذف ستون در پلان و تاثیر حذف ستون‌ها در پتانسیل خرابی پیش‌رونده انجام شده است. با توجه به استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و محدودیت ارتفاع مجاز برای ضریب رفتار ساختمان‌ها (R_{II})، سیستم دوگانه در این سازه‌ها از نوع قاب خمشی بتن آرمه متوسط به همراه دیوار برشی بتن آرمه ویژه در نظر گرفته شده است. مدل‌های در نظر گرفته شده در نرم افزار ETABS-2019 مدل‌سازی شده و تحلیل غیرخطی بار افزایشنده قائم (Push Down) بر روی آن انجام شده است. تحلیل

حساسیت در خرابی پیش‌رونده و تحلیل و بررسی شاخص حساسیت سازه با استفاده از نسبت ظرفیت باربری سازه پس از حذف عضو به ظرفیت باربری کل سازه انجام شده است. از جمله دیگر اهداف پژوهش حاضر، بررسی عملکرد زنجیره‌ای و موقعیت ستون در پتانسیل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های بتن آرمه با سیستم دوگانه، می‌باشد.

۲- مدل‌سازی

مدل‌های سازه‌ای در پژوهش حاضر، مدل‌های سه بعدی با سیستم دوگانه بتن آرمه (قاب خمشی بتن آرمه متوسط و هسته متشکل از دیوارهای برشی بتن آرمه ویژه در مرکز سازه) و دال بتن آرمه می‌باشد. سازه‌های مورد بررسی دارای ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با ارتفاع طبقات ۴ متر با پلان مستطیل شکل با دهانه‌هایی به طول برابر ۶ متر و به همراه تیر طره به طول ۵ متر مطابق شکل ۲ است.



شکل ۲- پلان مستطیل شکل به همراه طره بزرگ سازه

تحلیل، طراحی و بارگذاری جانبی سازه‌های این پژوهش از مباحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۹ [۲۴]، ششم مقررات ملی ساختمان [۲۵] و از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۶] استفاده شده است. همچنین از آیین نامه GSA-2013 [۲]، برای تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشنده قائم (خرابی پیش‌رونده)

تکیه‌گاه‌های سازه‌ها به صورت اتصالات گیردار در نظر گرفته شده است. منطقه مورد بررسی با خطر نسبی زیاد و بر روی خاک از نوع تیپ II در شهر تهران می‌باشد. همچنین آرماتورهای مورد استفاده دارای تنش تسلیم 400 MPa است. بتن مورد استفاده در این مدل-ها بتن رده C25 دارای مقاومت مشخصه 25 MPa می‌باشد. در

استفاده گردیده است. ارائه گردیده است. ابعاد ستون‌ها، با تحلیل‌های متعدد و کنترل جابه‌جایی جانبی سازه براساس استاندارد ۲۸۰۰، در نرم افزار ETABS-2019 به دست آمده و نهایی شده است (شکل‌های ۳ تا ۵). تیر طره مورد نظر به طول ۵ متر در یک طرف سازه می‌باشد که به منظور بررسی تأثیر طره‌های بزرگ در خرابی پیش‌رونده دیوار برشی بتنی برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در جدول ۱ تا ۳

جدول ۱- مشخصات ابعادی سازه ۵ طبقه

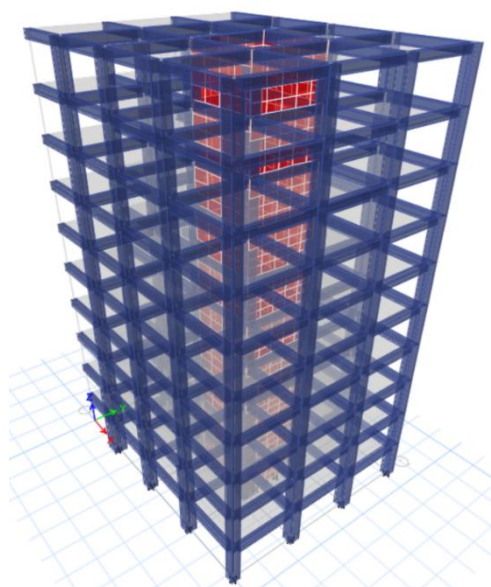
تیرها	ستون‌های گوشه	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	طبقه
مستطیلی- ۸۰cm*۶۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	۲-۱
مستطیلی- ۸۰cm*۶۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۸۰cm*۸۰cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	۳
مستطیلی- ۷۰cm*۵۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۸۰cm*۸۰cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	۴
مستطیلی- ۷۰cm*۵۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۸۰cm*۸۰cm	۵

جدول ۲- مشخصات ابعادی سازه ۱۰ طبقه

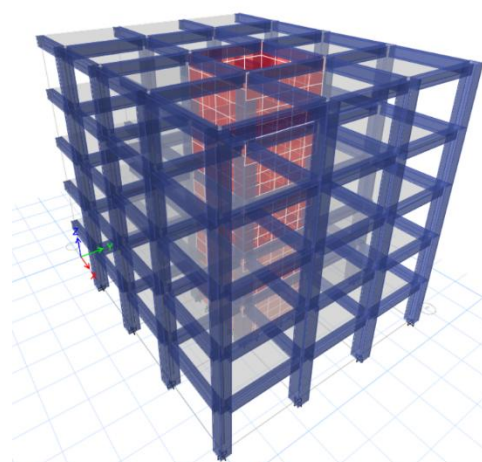
تیرها	ستون‌های گوشه	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	طبقه
مستطیلی- ۸۰cm*۶۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	مربعی- ۱۰۰cm*۱۰۰cm	۲-۱
مستطیلی- ۷۰cm*۵۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۸۰cm*۸۰cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	۴-۳
مستطیلی- ۷۰cm*۵۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۸۰cm*۸۰cm	۱۰-۵

جدول ۳- مشخصات ابعادی سازه ۱۵ طبقه

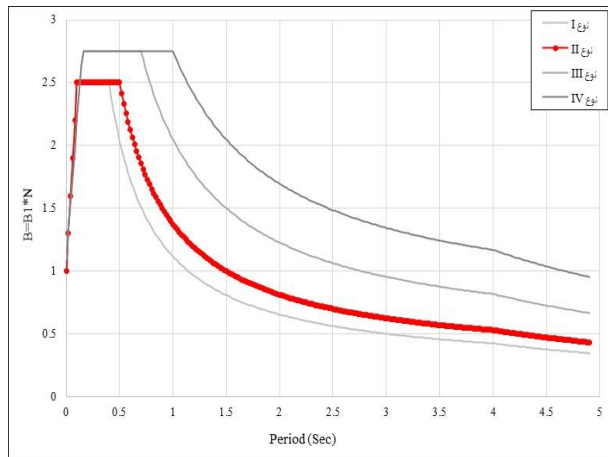
تیرها	ستون‌های گوشه	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	طبقه
مستطیلی- ۸۰cm*۶۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	مربعی- ۱۰۰cm*۱۰۰cm	۴-۱
مستطیلی- ۸۰cm*۶۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۸۰cm*۸۰cm	مربعی- ۹۰cm*۹۰cm	۶-۵
مستطیلی- ۷۰cm*۵۰cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۷۵cm*۷۵cm	مربعی- ۸۰cm*۸۰cm	۱۵-۷



شکل ۴- مدل سازه ۱۰ طبقه



شکل ۳- مدل سازه ۵ طبقه



شکل ۶- ضریب شکل طیف طرح برای زمین‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد

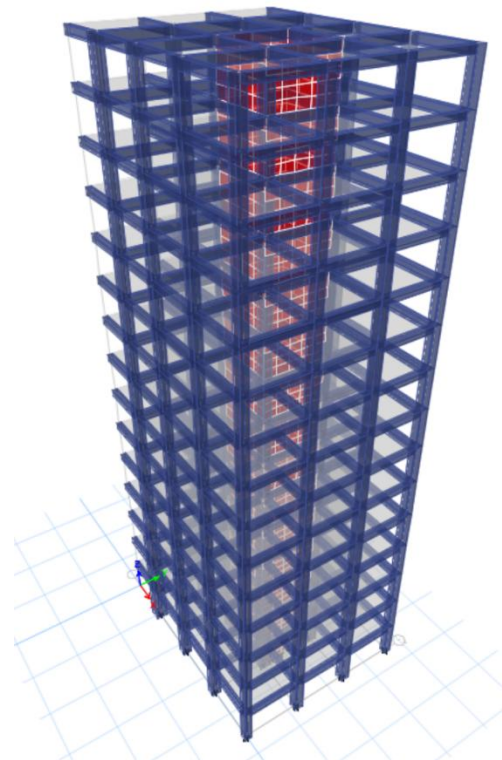
۲-۲- تحلیل استاتیکی غیر خطی افزایش یافته قائم

یکی از روش‌های تحلیل استاتیکی در بررسی خرابی پیش‌رونده، تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته قائم می‌باشد که در این روش نوع اثر غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. این روش، تحلیلی مشابه تحلیل پوش‌آور (Push Over) می‌باشد که در بحث عملکرد سازه در زلزله، مهندسی زلزله و عملکرد سازه در خرابی پیش‌رونده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از معایب این روش، عدم در نظر گرفتن اثر دینامیکی ستون یا عضو حذف شده در سازه می‌باشد. در پژوهش حاضر از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته قائم استفاده شده که سطح عملکرد سازه نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحلیل غیرخطی استاتیکی دو اثر غیرخطی هندسی و تغییر شکل‌های بزرگ در نظر گرفته شده است. در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته قائم کنترل جابه‌جایی تحلیلی بسیار ساده می‌باشد [۱۹] و از نظر همگرایی شرایط مطلوبی دارد. بارهای ثقلی به تمام تیرها وارد می‌شود و در تمام مراحل تحلیل ثابت می‌باشد. میزان بارهای متناظر با تغییر مکان قائم اعمال شده به نقطه ستون حذف شده در سازه، ثبت شده است.

بر اساس آیین‌نامه مدیریت تعمیرات کلی ایالات متحده آمریکا (GSA 2013) [۲]، ترکیب بار ثقلی وارد به سازه به صورت $DL+0.25LL$ اعمال می‌شود، سپس به دهانه‌های مجاور ستون حذف شده، ترکیب بارهای متناظر با ضریب بزرگنمایی ۲ ($2(DL+0.25LL)$) اعمال می‌گردد (شکل ۷).



شکل ۵- مدل سازه ۱۵ طبقه

۱-۲- تحلیل دینامیکی طیفی

با توجه به استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، به دلیل آن که در یکی از گوشه‌های پلان ساختمان، بیرون‌زدگی بیش از ۲۰ درصد طول پلان است، ساختمان دارای نامنظمی در پلان می‌باشد.

همچنین با توجه به استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، برای سازه اصلی که ۱۵ طبقه با ارتفاع طبقه ۴ متر نمی‌توان از روش استاتیکی معادل برای تحلیل خطی استفاده نمود، زیرا این ساختمان ارتفاع بیشتر از ۵۰ متر از تراز پایه دارد و به دلیل وجود تیر طره ۵ متری در یک جهت سازه، ساختمان دارای نامنظمی پیچشی زیاد در پلان (مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، $< 1/4$ نامنظمی پیچشی سازه مورد نظر $< 1/2$) است.

در تحلیل دینامیکی طیفی، ابتدا تحلیل مقادیر ویژه بر روی مدل سازه که بر اساس رفتار خطی تهیه گردیده، انجام شده و مشخصات مدهای طبیعی نوسان آن، تعیین شده است. سپس حداکثر بازتاب در هر مد با توجه به زمان تناوب آن مد از طیف طرح به دست آمده و با ترکیب آماری آن‌ها بازتاب کلی سازه تعیین شده است. نمودار ضریب طیف طرح (B1) برای زمین‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد در نظر گرفته شده است (شکل ۶).

مقدار تغییر مکان هدف از رابطه (۱) به دست می آید.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

T_e : زمان تناوب اصلی موثر ساختمان

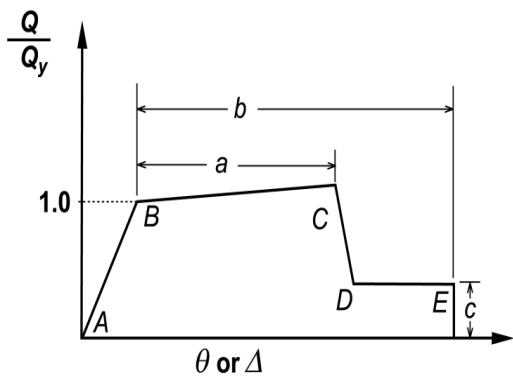
C_0 : ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی

C_1 : ضریب اعمال تغییر مکان غیر ارتجاعی سیستم

C_2 : ضریب کاهش اثرات سختی و مقاومت اعضای سازه

S_a : شتاب طیفی به ازای زمان تناوب موثر (براساس نشریه ۳۶۰)

در شکل ۹ ارتباط بین برش پایه و تغییر مکان جانبی که بیانگر سطح عملکرد سازه می باشد، نشان داده شده است. براساس نشریه ۳۶۰، سطوح عملکرد ساختمان بر مبنای عملکرد اجزای سازه ای و غیر سازه ای تعریف می شود. سطوح عملکرد اجزای سازه ای شامل چهار سطح اصلی: قابلیت استفاده بی وقفه (IO)، ایمنی جانبی (LS)، آستانه فروریزش (CP) و سطح عملکرد لحاظ نشده، می باشد. با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی افزاینده قائم می توان تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در هر یک از این سطوح را به دست آورد. ضرایب a ، b و c نشان دهنده رفتار غیر خطی سازه می باشند که مطابق ASCE/SEI 41-17 [۲۷] محاسبه می گردند.



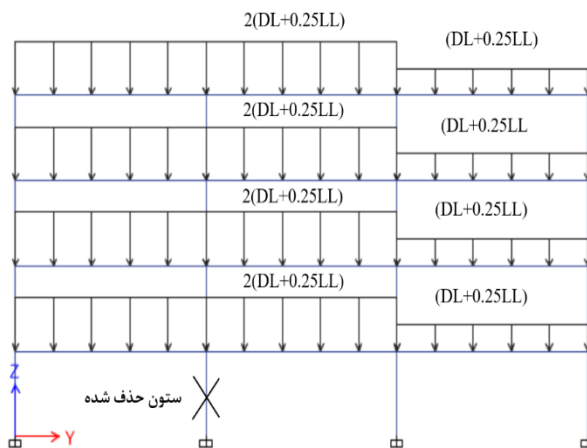
شکل ۹- منحنی برش پایه-تغییر مکان جانبی، سطوح عملکرد

سازه [۲۸]

۳-۲- تحلیل حساسیت خرابی پیش رونده

برای تعیین امان کلیدی در سازه، براساس ظرفیت کلی سازه قبل و بعد از حذف ستون (عضو سازه ای) شاخص حساسیت محاسبه و بررسی می شود. این شاخص از رابطه (۲) محاسبه می گردد [۲۹].

$$SI = \frac{\lambda_0 - \lambda_{damage}}{\lambda_0} \quad (2)$$

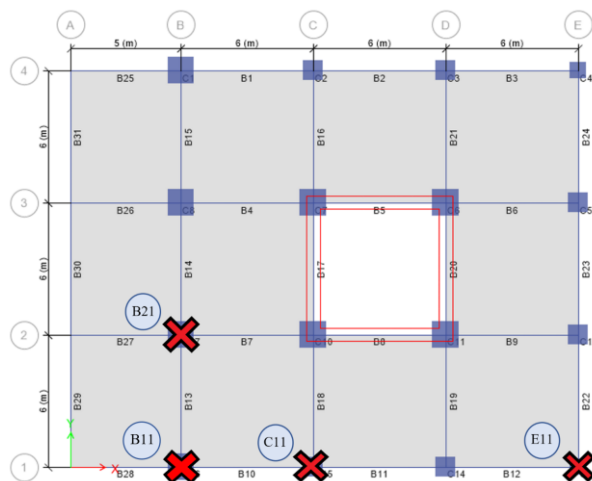


شکل ۷- نحوه ترکیب بار در تحلیل استاتیکی غیر خطی

براساس آیین نامه GSA [۲]

۲-۲-۱- موقعیت حذف ستون ها در سازه

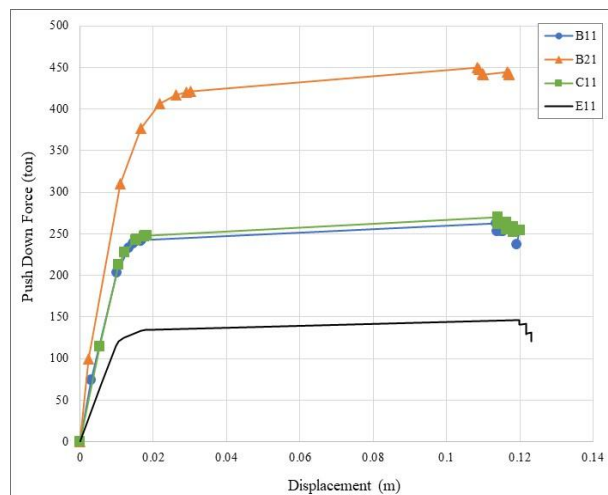
موقعیت حذف ستون ها در پلان سازه مورد نظر، در ۴ موقعیت نشان داده شده در شکل ۸، شامل: ستون کنار تیر طره به فاصله ۵ متر (B11)، ستون میانی نزدیک تیر طره (B21) به فاصله ۵ متر، ستون + - گوشه دورترین حالت از تیر طره به فاصله ۲۳ متر و ستون داخلی بین گوشه پلان و تیر طره (C11) به فاصله ۱۱ متر، می باشد.



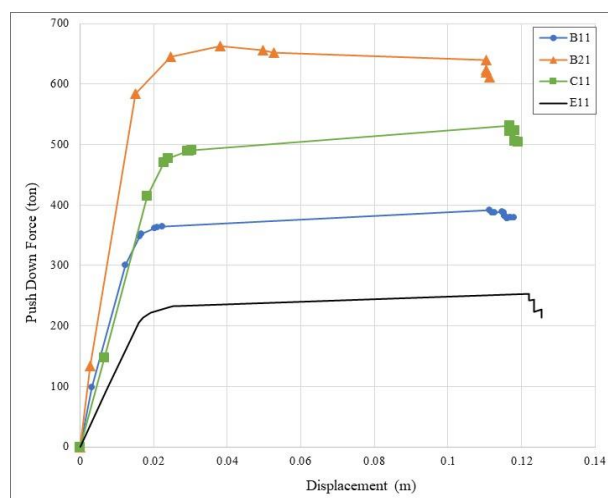
شکل ۸- موقعیت ستون های حذف شده در پلان طبقات سازه

در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی افزاینده، بار ناشی از زلزله به تدریج افزایش می یابد و به سازه اعمال می گردد تا جایی که در نقطه کنترل تحت بار جانبی به میزان تغییر مکان هدف جابه جا شود و سازه فرو بریزد. تغییر مکان هدف برای سازه با دیافراگم های صلب باید با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی سازه برآورد شود.

فاصله ۲۳ متری از تیر طره به ترتیب در هر یک از سازه‌ها دارای شاخص حساسیت ۸۷٪، ۷۷٪ و ۶۶٪ و بعد از آن ستون B11 (ستون گوشه نزدیک به تیر طره) با فاصله ۵ متری از تیر طره به ترتیب دارای ۷۴٪، ۵۸٪ و ۴۲٪ مقدار شاخص حساسیت می‌باشد. با توجه به نتایج ستون E11 به عنوان المان کلیدی در خرابی پیش‌رونده در سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۱- منحنی نیرو-جاب‌جایی حذف ستون‌ها در سازه ۱۰ طبقه



شکل ۱۲- منحنی نیرو-جاب‌جایی حذف ستون‌ها در سازه ۱۵ طبقه

جدول ۴- مقادیر شاخصیت حساسیت برای سازه ۵ طبقه

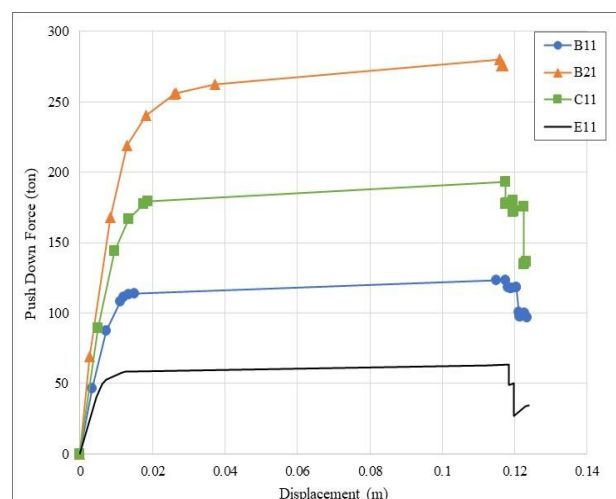
ستون حذف شده	λ_0 (ton)	λ_{damage} (ton)	SI	درصد خرابی
B11	۴۷۸/۹۷	۱۲۳/۳۵	۰/۷۴	۷۴٪
B21	۴۷۸/۹۷	۲۸۰/۰۹	۰/۴۲	۴۲٪
C11	۴۷۸/۹۷	۱۷۹/۹۵	۰/۶۲	۶۲٪
E11	۴۷۸/۹۷	۶۳/۳۹	۰/۸۷	۸۷٪

λ_0 : ظرفیت باربری کل سازه قبل از حذف ستون (المان سازه‌ای)
 λ_{damage} : ظرفیت باربری کل سازه بعد از حذف ستون (المان سازه‌ای)

هرچه شاخص حساسیت (SI) برای المان سازه‌ای بیشتر باشد، ظرفیت باربری سازه در صورت حذف آن المان، کمتر است، در نتیجه المانی که شاخص حساسیت بیشتر نسبت به دیگر اعضا دارد، المان کلیدی سازه می‌باشد.

۳- نتایج

در این پژوهش، برای تعیین بحرانی‌ترین المان سازه (ستون) در فرایند خرابی پیش‌رونده، همانند شکل ۸ ستون‌های مورد نظر حذف و تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام شده است. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیر خطی افزاینده قائم برای موقعیت‌های متفاوت حذف ستون در طبقه اول در سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه ارائه شده است.



شکل ۱۰- منحنی نیرو-جاب‌جایی حذف ستون‌ها در سازه ۵ طبقه

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان مقادیر ظرفیت کل سازه قبل و پس از حذف ستون را محاسبه کرد و بر این اساس می‌توان مقادیر شاخص حساسیت را برای هر کدام از حالت‌های حذف ستون در هر یک از سازه‌ها به دست آورد.

در جدول‌های ۴ تا ۶ مقادیر شاخص حساسیت و خرابی کل سازه-های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در تمامی موقعیت‌های حذف ستون ارائه شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده از سازه‌های بتنی با سیستم دو گانه (قاب خمشی بتن آرمه متوسط با دیوار برشی بتن-آرمه ویژه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، ستون E11 (واقع در گوشه پلان) با

نامعینی سازه» خواهد شد.

جدول ۷- شاخص حساسیت نسبت به ابعاد کل سازه

سطح سازه	ارتفاع سازه (m)	طول سازه (m)	نسبت ابعادی سازه	SI	درصد خرابی کل سازه
۵ طبقه	۲۰	۲۳	۰/۸۷	۰/۸۷	۸۷٪
۱۰ طبقه	۴۰	۲۳	۱/۷۴	۰/۷۷	۷۷٪
۱۵ طبقه	۶۰	۲۳	۲/۶۱	۰/۶۶	۶۶٪

در فرایند انهدام پیش‌رونده با افزایش درجه نامعینی سازه باز توزیع نیروها به نحو بهتری صورت می‌گیرد. بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت با افزایش ۳ برابری ارتفاع سازه از ۲۰ m به ۶۰ m، درجه نامعینی سازه و نسبت ابعادی بیشتر می‌شود که در نتیجه باعث کاهش شاخص حساسیت به میزان ۰/۲۱ می‌شود و شرایط سازه پایدارتر می‌گردد.

با توجه به نتایج، مقدار شاخص حساسیت در هر سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، حذف ستون گوشه پلان با بیشترین فاصله از تیر طره (فاصله ۲۳ متری از تیر طره) به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۷۷ و ۰/۶۶ می‌باشد که می‌تواند شرایط بحرانی تری در سازه از نظر خرابی پیش‌رونده ایجاد کند.

در جدول‌های ۸ تا ۱۰ به بررسی تعداد مفاصل پلاستیک و سطح عملکرد سازه پرداخته شده و نتایج ارائه گردیده است. با توجه به نتایج همانطور که مشاهده می‌شود تعدادی از المان‌ها در هر ۳ سازه (۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه) دچار شکست نهایی می‌شوند و با کاهش ارتفاع سازه، شاخص حساسیت در المان‌هایی که دچار شکست می‌شوند، افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود (جدول‌های ۸ و ۹) هیچ کدام از اعضای سازه در صورت حذف ستون‌های E11 و C11 در سازه‌ها دچار شکست نهایی نمی‌شوند اما در هر ۳ سازه با حذف ستون‌های B11 و B21 (جدول ۱۰)، یک المان با تشکیل مفصل پلاستیک و با ادامه بارگذاری دچار شکست نهایی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر تیر طره بزرگ در خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتن آرمه با سیستم دو گانه (قاب خمشی بتن

جدول ۵- مقادیر شاخص حساسیت برای سازه ۱۰ طبقه

ستون حذف شده	λ_0 (ton)	λ_{damage} (ton)	SI	درصد خرابی
B11	۶۲۶/۳۳	۲۶۲/۱۳	۰/۵۸	۵۸٪
B21	۶۲۶/۳۳	۴۵۰/۰۵	۰/۲۸	۲۸٪
C11	۶۲۶/۳۳	۲۷۰/۱۴	۰/۵۷	۵۷٪
E11	۶۲۶/۳۳	۱۴۱/۷۰	۰/۷۷	۷۷٪

جدول ۶- مقادیر شاخص حساسیت برای سازه ۱۵ طبقه

ستون حذف شده	λ_0 (ton)	λ_{damage} (ton)	SI	درصد خرابی
B11	۷۳۶/۷۲	۳۹۱/۳	۰/۴۲	۴۲٪
B21	۷۳۶/۷۲	۶۶۳/۰۵	۰/۱۰	۱۰٪
C11	۷۳۶/۷۲	۵۳۱/۲۲	۰/۲۸	۲۸٪
E11	۷۳۶/۷۲	۲۵۳/۱۹	۰/۶۶	۶۶٪

با توجه به مقادیر ستون E11، بیشترین پتانسیل خرابی را در ایجاد خرابی پیش‌رونده و کمترین عملکرد زنجیره‌ای را دارا می‌باشد. در هر یک از سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با حذف ستون E11، ظرفیت نهایی سازه به میزان قابل توجهی نسبت به حذف دیگر ستون‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه λ_{damage} (ظرفیت باربری پس از حذف ستون) هر یک از ستون‌ها در سازه ۵ طبقه مشاهده می‌شود، λ_{damage} ستون E11 به ۶۳/۳۹ ton کاهش یافته است که نسبت به λ_{damage} دیگر ستون‌ها، مقدار کمتری می‌باشد. در سازه ۱۰ و ۱۵ طبقه λ_{damage} ستون E11 ۱۴۱/۷۰ و ۲۵۳/۱۹ می‌باشد که در مقایسه با λ_{damage} دیگر ستون‌ها و مقدار λ_0 (به ترتیب در سازه ۱۰ و ۱۵ طبقه ۶۲۶/۳۳ و ۷۳۶/۷۲) به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

همچنین در جدول ۷ مقادیر شاخص حساسیت و درصد خرابی کل در هر یک از سازه‌ها به ازای نسبت ارتفاع کل سازه به طول پلان سازه ارائه شده است. با توجه به نتایج، می‌توان گفت در پلان مستطیل شکل با تیر طره ۵ متری در یک سمت سازه با سیستم دو گانه قاب خمشی بتن آرمه و دیوار برشی بتن آرمه، مقدار شاخص حساسیت در حداکثر نسبت ارتفاع کل به طول پلان (نسبت ابعادی ۲/۶۱)، ۰/۶۶ می‌باشد. افزایش ارتفاع، افزایش تعداد طبقات را پی خواهد داشت و افزایش تعداد طبقات باعث افزایش تعداد المان‌های باربر می‌شود که در نتیجه سبب افزایش قابل توجه «درجه

باربر بیشتر می شود که سبب افزایش قابل توجه درجه نامعینی سازه خواهد شد. با افزایش درجه نامعینی سازه باز توزیع نیروها به نحو بهتری انجام می گیرد. شاخص حساسیت سازه های بتن آرمه با سیستم دوگانه بر خلاف شاخص حساسیت سازه های فولادی دوگانه [۱۸]، با افزایش ۳ برابری ارتفاع از مقدار ۰/۸۷ به ۰/۶۶ کاهش می یابد و عملکرد سازه ۱۵ طبقه در صورت حذف ستون نسبت به سازه ۵ طبقه بهتر می شود.

با توجه به نتایج به دست آمده و بررسی ها، مشاهده می شود در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با پلان مستطیل شکل و سیستم دوگانه و تیر طره بزرگ در یک سمت سازه، با حذف ستون گوشه پلان با فاصله ۲۳ متری از تیر طره (E11)، به ترتیب شاخص حساسیت ۰/۸۷، ۰/۷۷ و ۰/۶۶ به دست می آید و شرایط بحرانی تری نسبت به ستون گوشه به فاصله ۵ متری از تیر طره (B11)، با شاخص حساسیت به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۵۸ و ۰/۴۲ در سازه ایجاد می شود.

مفاصل پلاستیک در سازه های مورد بررسی (۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه) در صورت حذف ستون های گوشه پلان به فاصله ۲۳ متری از تیر طره و میانی پلان به فاصله ۱۷ متری از تیر طره (E11 و C11)، هیچ کدام از المان های آن ها، دچار شکست نهایی نشده است. با حذف ستون های مورد نظر (E11 و C11) در کلیه سازه ها تعدادی از المان ها در آستانه فروریزش قرار می گیرند ولی دچار شکست نهایی نمی شوند، اما با حذف ستون های B11 و B21 (ستون های نزدیک به تیر طره با فاصله ۵ متری) در هر سه سازه ۱۰، ۱۵ و ۱۵ طبقه، یک المان در طبقه اول دچار شکست نهایی می شود ولی شکست نهایی این المان به خصوص در صورت حذف ستون B21 شرایط بحرانی در سازه ایجاد نمی کند.

۵- مراجع

- [1] U. Starossek, *Progressive collapse of structures*, vol. 153. thomas telford London, 2009.
- [2] GSA, "General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance," *Washington, DC*, 2013.
- [3] "Design of buildings to resist progressive collapse," *Unified Facil. Criteria*, 2005.
- [4] M. Byfield, W. Mudalige, C. Morison, and E. Stoddart, "A review of progressive collapse research and regulations," *Proc. Inst. Civ. Eng. Build.*, vol. 167, no. 8, pp. 447-456, 2014.

آرمه متوسط و دیوار برشی بتن آرمه ویژه) و پلان مستطیل شکل ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، در نرم افزار ETABS-2019 پرداخته شده است.

جدول ۸- تشکیل مفاصل و سطح عملکرد هر کدام در سازه ۵ طبقه

ستون حذف شده	تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده			
	>CP	LS-CP	IO-LS	A-IO
E11	۰	۸	۲۲	۴۰۸
B11	۱	۷	۱۳	۴۰۷
C11	۰	۸	۳۲	۳۹۶
B21	۱	۲	۲۸	۴۰۵

جدول ۹- تشکیل مفاصل و سطح عملکرد هر کدام در سازه ۱۰ طبقه

ستون حذف شده	تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده			
	>CP	LS-CP	IO-LS	A-IO
E11	۰	۵	۵۱	۸۲۲
B11	۱	۵	۳۵	۸۳۵
C11	۰	۳	۷۳	۸۰۲
B21	۱	۵	۵۵	۸۱۷

جدول ۱۰- تشکیل مفاصل و سطح عملکرد هر کدام در سازه ۱۵ طبقه

ستون حذف شده	تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده			
	>CP	LS-CP	IO-LS	A-IO
E11	۰	۷	۷۵	۱۲۳۶
B11	۱	۴	۵۶	۱۲۵۵
C11	۰	۵	۱۰۷	۱۲۰۶
B21	۱	۰	۹۰	۱۲۲۷

مقادیر مختلف شاخص حساسیت در موقعیت های متفاوت حذف ستون در پلان سازه و تاثیر افزایش ارتفاع بر عملکرد سازه در صورت حذف ستون، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در صورت حذف المان و محاسبه مقادیر شاخص حساسیت، هر چه مقادیر شاخص حساسیت به ۱ نزدیک شود، المان مربوط به موقعیت حذف شده، المان کلیدی و مهمی در خرابی پیش رونده می باشد.

نتایج به دست آمده برای مقادیر شاخص حساسیت کل سازه و مقایسه آن ها در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، نشان می دهد در سازه های بتن آرمه با سیستم دوگانه (قاب خمشی متوسط به همراه دیوار برشی ویژه) و دارای تیر طره بزرگ، با افزایش ۳ برابری ارتفاع از ۲۰ m به ۶۰ m، تعداد طبقات بیشتر شده در نتیجه تعداد المان های

- [18] M. Maddahi and A. Kheyroddin, "Assessment of the progressive collapse in the steel moment frames with L-shaped plan using sensitivity analysis (In Persian)," *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 73–85, 2016.
- [19] H. Rouhi and A. Kheyroddin, "Progressive collapse analysis of reinforced concrete in buildings L-shaped plan (In Persian)," *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 44–65, 2018, doi: 10.22065/jsce.2017.86035.1174.
- [20] M. Taavoni Taromsari, A. Massumi, and H. Hoseini Lavasani, "Progressive Collapse Induced by Column Removal in Reinforced Concrete Frames," *Amirkabir J. Civ. Eng.*, vol. 50, no. 6, pp. 1061–1070, 2019, doi: 10.22060/ceej.2017.12421.5211.
- [21] Y. Wang, B. Zhang, X.-L. Gu, and F. Lin, "Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of RC frame structures considering transverse beam and slab effects," *J. Build. Eng.*, vol. 47, p. 103908, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103908>.
- [22] Z. Zhao *et al.*, "Experimental and numerical investigation of dynamic progressive collapse of reinforced concrete beam-column assemblies under a middle-column removal scenario," *Structures*, vol. 38, pp. 979–992, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.050>.
- [23] P. Neeraja and K. Anish, "Investigation on progressive collapse failure in a multistorey irregular structure," *Mater. Today Proc.*, vol. 51, pp. 538–542, 2022.
- [24] 9 Code, *Design and implementation of reinforced concrete structures, Mabhas 9, 99st Version (In Persian)*. 2021.
- [25] 6 Code, *Loads on the building, Mabhas 6 (In Persian)*. .
- [26] 2800 Code, *2800 Code, Seismic resistant desing of buildings-Code of the practice of Iran. 4st version (In Persian)*. .
- [27] ASCE standard ASCE/SEI 41-17, *American Society of Civil Engineers, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. 2018.
- [28] F. Pre-standard, "commentary for the seismic rehabilitation of buildings, report FEMA-356," *Washington, DC SAC Jt. Ventur. Fed. Emerg. Manag. Agency*, 2000.
- [29] J. H. Choi, M. Ito, and K. Ohi, "Prevention of Building Structural Collapse Caused by Accidental Events," in *proc. Of 2nd International Symposium on Improvement of Structural Safety for Building Structures*, 2007, pp. 85–98.
- [5] A. Astaneh-Asl, "Progressive collapse prevention in new and existing buildings," 2003.
- [6] F. Kiakojoury, "Influence of sudden column loss on dynamic response of steel moment frames under blast loading," *Int. J. Eng.*, vol. 26, no. 2, pp. 197–206, 2013.
- [7] F. Fu, "Dynamic response and robustness of tall buildings under blast loading," *J. Constr. steel Res.*, vol. 80, pp. 299–307, 2013.
- [8] J. Sideri, C. L. Mullen, S. Gerasimidis, and G. Deodatis, "Distributed column damage effect on progressive collapse vulnerability in steel buildings exposed to an external blast event," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 31, no. 5, p. 4017077, 2017.
- [9] H. Kang and J. Kim, "Progressive collapse of steel moment frames subjected to vehicle impact," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 29, no. 6, p. 4014172, 2015.
- [10] J. Jiang and G.-Q. Li, "Progressive collapse analysis of 3D steel frames with concrete slabs exposed to localized fire," *Eng. Struct.*, vol. 149, pp. 21–34, 2017.
- [11] H. R. Tavakoli and A. H. Hasani, "Effect of Earthquake characteristics on seismic progressive collapse potential in steel moment resisting frame," *Earthq. Struct.*, vol. 12, pp. 529–541, 2017.
- [12] A. Elshaer, H. Mostafa, and H. Salem, "Progressive collapse assessment of multistorey reinforced concrete structures subjected to seismic actions," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 184–194, 2017.
- [13] F. Kiakojoury, M. R. Sheidaii, V. De Biagi, and B. Chiaia, "Progressive collapse assessment of steel moment-resisting frames using static-and dynamic-incremental analyses," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 34, no. 3, p. 4020025, 2020.
- [14] J. Kim and T. Kim, "Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 169–179, 2009.
- [15] F. Mehrabi, A. Kheyroddin, and M. Gerami, "A sssessment of Progressive Collapse Potential of Steel Structures that are Designed on Iranian Code (In Persian)," *Sharif J. Civ. Eng.*, vol. 228, no. 4, pp. 65–72, 2012.
- [16] J.-L. Le and B. Xue, "Probabilistic analysis of vulnerability of reinforced concrete buildings against progressive collapse," in *Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession*, 2013, pp. 20–31.
- [17] H. Jian, S. Li, and L. Huanhuan, "Testing and analysis on progressive collapse-resistance behavior of RC frame substructures under a side column removal scenario," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 30, no. 5, p. 4016022, 2016.

Investigation of the effect of cantilever beam on progressive collapse of reinforced concrete structures with dual strength system

Seyedeh Marzieh Qiyami Taklymi

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Ali Kheyroddin *

Distinguished Prof., Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract

The most important issues of passive defense in structures is the issue of progressive collapse. Progressive collapse occurs as a result of events deliberate and administrative, military, terrorist, earthquakes and floods. In progressive collapse, due to the destruction of one member of the structure, the failure is transmitted to other members of the structure and the failure extends in a chain throughout the structure and causes the destruction part of or the entire structure. Determining the key element in the structure and strengthening can prevent progressive collapse, total destruction of the structure and the resulting damage. In this paper, 5, 10, and 15 stories structures with dual system with cantilever beam. To investigate the effect of cantilever beams and the determine key element in reinforced concrete structures with dual system by the sensitivity index method and structural analysis is used by non-linear static analysis of vertical down (Push Down Analysis). The results show that in reinforced concrete structures with dual strength system with cantilever beam, the column failure index with the longest distance from the cantilever beam (23 m) compared to other columns in each three structure 5, 10 and 15 story is 87%, 77%, and 66%, respectively, which is considered as a key element in these structures. According to results, in case of increasing the height of structure with cantilever beam with dual strength system from 20 meters (5 story) to 60 meters (15 story), the failure index of the whole structure will decrease from 87% to 66%.

Keywords: Progressive Collapse, Nonlinear Static Analysis, Sensitivity Index, Key Elements, Cantilever Beam.

* Corresponding Author: kheyroddin@semnan.ac.ir