

# شبیه‌سازی رایانه‌یی نحوه‌ی فرو ریختن ساختمان‌های بلندمرتبه‌ی بتن مسلح با قاب خمشی

محمد قاسم سحاب\* (استادیار)

مهدی حبیبی (کارشناس ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تفرش

مهندسی عمران تفرش، (پاییز ۱۳۹۷)  
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۳، ص. ۱۲۱-۱۳۰، (پادداشت ثنی)

پیش‌بینی روند تخریب کنترل‌شده‌ی یک سازه به‌وسیله‌ی مواد منفجره یا فرو ریزش آن تحت بارگذاری‌های فوق‌العاده، از جمله موضوعاتی است که در دهه‌های اخیر موردتوجه طراحان و مهندسان سازه قرار گرفته است. در نوشتار حاضر، روند فرو ریختن سازه‌های بلندمرتبه‌ی بتن مسلح با قاب خمشی در اثر حذف اعضاء معینی از آن‌ها تحت سناریوهای مختلف تخریب کنترل و یا تحت بارگذاری‌های غیرعادی به کمک رایانه شبیه‌سازی شده است. نرم‌افزار رایانه‌یی ساخته‌شده برای شبیه‌سازی روند تخریب قادر است با انجام تحلیل‌های متوالی و با فرض یک رفتار کشسان-خمیری معلوم برای مصالح، روند تشکیل مفاصل خمیری را دنبال کند، اعضایی از سازه که جواب‌گوی معیارهای خرابی نباشند را حذف کند، مدل هندسی سازه را پی‌درپی به روز کند و نحوه‌ی فرو ریختن آن را نمایش دهد. نحوه‌ی فرو ریختن تعدادی ساختمان به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و با بررسی نتایج به‌دست آمده، کارکرد نرم‌افزار صحت‌سنجی شده است. همچنین به کمک نرم‌افزار محصول پژوهش حاضر، طرح ریزی تخریب کنترل‌شده‌ی ساختمان‌ها به شکل دلخواه و هدایت‌شده میسر شده است. به‌علاوه روند تخریب در خرابی‌های پیش‌رونده نیز قابل پیش‌بینی است.

واژگان کلیدی: تخریب کنترل‌شده، شبیه‌سازی رایانه‌یی، ساختمان‌های بلندمرتبه، قاب خمشی بتن مسلح.

## ۱. مقدمه

پیش‌بینی روند تخریب یک سازه پس از وقوع یک یا چند خرابی تحت بارگذاری‌های فوق‌العاده و یا حتی تحت خرابی‌های عمدی با استفاده از مواد منفجره‌ی مخصوص تخریب، برای تخریب مهارشده یا تحت اختیار<sup>۱</sup> یک سازه از جمله موضوعاتی است که موردنیاز جامعه‌ی مهندسی است.

از سویی دیگر، پدیده‌ی فروپاشی پیش‌رونده<sup>۲</sup> در سازه‌ها، شکل احتمالی از روند تخریب یک سازه است که آسیب موضعی را به تخریبی با مقیاس بزرگ‌تر تبدیل می‌کند. در پدیده‌ی مذکور، تخریب با از دست رفتن ظرفیت باربری یک یا چند عضو شروع و با تغییر مسیر انتقال و توزیع مجدد بار برای سایر اعضا، به قسمت‌های دیگر سازه نیز سرایت می‌کند و منجر به تخریب کلی سازه یا قسمتی از آن می‌شود. در این راستا، در پژوهشی در سال ۱۹۹۲ به شبیه‌سازی تخریب کنترل‌شده‌ی یک ساختمان ۳ طبقه‌ی بتن مسلح پرداخته و با بررسی میکروسکوپی اعضای سازه‌یی، هر عضو به‌صورت متشکل از المان‌های محدود کروی‌شکل با اتصالات

\* نویسنده مسئول

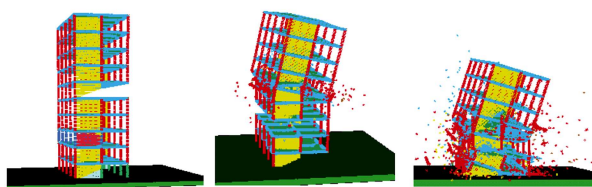
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۵/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۱۸، پذیرش ۱۳۹۵/۹/۱.

DOI:10.24200/J30.2018.1413

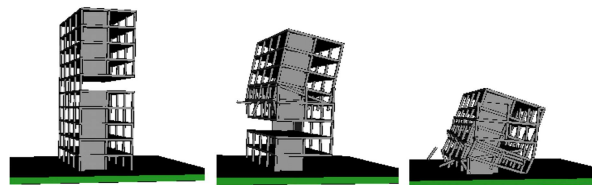
sahab@aut.ac.ir  
habibimahdi69@yahoo.com

فتری در نظر گرفته شد؛ و یک مدل آزمایشگاهی با نصف اندازه‌ی واقعی آزمایش و نتایج حاصل انطباق وضعیت نحوه‌ی فرو ریختن سازه با مدل شبیه‌سازی نشان داده شد.<sup>[۱]</sup> در سال ۲۰۰۸ نیز روند فرو ریزش یک انبار ۷ طبقه‌ی بتن مسلح با استفاده از آنالیز چندمرحله‌یی<sup>۳</sup> تحت نرم‌افزار CADCE شبیه‌سازی شد و در آن راهبردهای بهینه‌ی انفجار، بهبود کنترل فرو ریزش سازه، منطقه‌ی مجاز سقوط آوار و آستانه‌ی ارتعاش زمین بررسی شد. در نهایت کارآمدی شبیه‌سازی با انجام عملیات تخریب در دنیای واقعی تأیید شد.<sup>[۲]</sup>

همچنین در سال ۲۰۱۱، با استفاده از مدل المان مجزا و گره‌ی مشترک، به شبیه‌سازی عددی تخریب انفجاری یک سازه‌ی ۱۶ طبقه‌ی قاب خمشی بتن مسلح به کمک نرم‌افزار LS-DYNA اقدام و در شبیه‌سازی مکانیسم فرو ریزش و شکست ستون‌ها تحت تخریب انفجاری مطالعه شد و در نهایت، محدوده‌ی سقوط سازه و فرود آمدن آوار محاسبه و با واقعیت مقایسه شد.<sup>[۳]</sup> در سال ۲۰۱۱ نیز یک مدل غیرخطی المان محدود از بلندترین ساختمان در چین، برج شانگهای (۶۳۲ متر) ایجاد شد و با معیارهای شکست مشخص برای عناصر سازه‌یی و تجزیه و تحلیل دینامیکی، به پیش‌بینی حالت‌های شکست احتمالی و فروپاشی سازه تحت زمین لرزه‌های



الف) شبیه سازی در نرم افزار CADCE



ب) شبیه سازی در نرم افزار LS-DYNA

شکل ۱. مقایسه‌ی شبیه‌سازی نحوه‌ی تخریب ساختمان ۱۰ طبقه. [۱۲]

تولیدشده‌ی خود ( $ELSV/3/1$ )، توانست مراحل تخریب یک سازه‌ی سه‌بعدی را تا سقوط آوار شبیه‌سازی کند. [۹] پیش‌بینی نحوه‌ی تخریب موزه‌ی چارلوت<sup>۷</sup> کالیفرنیا در سال ۲۰۰۷ به‌صورت کنترل‌شده، اولین استفاده از نرم‌افزار مذکور برای انجام یک تخریب مهارشده و عمدی بوده است. نتایج شبیه‌سازی دینامیکی غیرخطی برای برنامه‌ریزی تخریب کنترل‌شده‌ی واقعی و ارائه‌ی تضمین درخصوص ایمنی از ترتیب تخریب‌ها استفاده شده است. [۱۰] شرکت مذکور آثار ناشی از انفجار اوکلاه‌ماسیتی را نیز با تمامی جزئیات مدل کرد، به‌گونه‌ی که نتایج حاصل کاملاً مطابق با واقعیت بوده است. [۱۱]

نرم‌افزار شبیه‌ساز چندمرحله‌ی و بهینه‌ساز روند تخریب CADCE نیز جزء آن دسته از نرم‌افزارهای مهمی است که عمدتاً برای مهندسی کردن تخریب ساختمان‌ها به‌صورت کنترل‌شده از آن استفاده می‌شود. نرم‌افزار مذکور با انجام چندمرحله‌ی فرایند آنالیز<sup>۸</sup> تا ۳۰ برابر، مدت زمان پروسه‌ی پردازش را نسبت به نرم‌افزارهای اجزاء محدود کاهش می‌دهد. آنالیز دینامیکی چندمرحله‌ی نرم‌افزار مذکور از نتایج معادله‌ی حرکت لاگرانژ و استفاده از روابط آدامز است که باعث شده است تا نتایج آن دقیق و کاربردی باشد. نرم‌افزارهای آباکوس<sup>۹</sup>، انسیس<sup>۱۰</sup>، LS DYNA و MSC-MARC- نیز جزء آن دسته از نرم‌افزارهای مبتنی بر روش اجزاء محدود و شبیه‌ساز بار انفجار و روند تخریب هستند که هرکدام نقاط قوت و وضعی دارند.

در سال ۲۰۰۹، روند تخریب کنترل‌شده‌ی ساختمان ۱۰ طبقه‌ی بتنی با دیوار برشی در یک شبیه‌سازی چندمرحله‌ی با ۲۲۰ المان صلب در نرم‌افزار CADCE انجام شد که برای شبیه‌سازی ۳ ثانیه‌ی وقوع آن، ۲ ساعت تحلیل توسط نرم‌افزار انجام گرفت و نشان داده شد که برای تحلیل سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی مذکور توسط نرم‌افزار LS DYNA نیاز به تعریف ۱۴۶۹۲۰ المان شش‌وجهی و ۶۰ ساعت تحلیل برای شبیه‌سازی ۴ ثانیه‌ی وقوع آن است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نتایج نشان داد که با وجود تفاوت عمده در مدت زمان پروسه‌ی پردازش، تفاوت خاصی در نحوه‌ی تخریب وجود ندارد. [۱۲]

### ۳. الگوریتم شبیه‌سازی روند پیشرفت تخریب و

#### فروریختن یک سازه

جهت ساخت نرم‌افزار شبیه‌ساز روند فروریختن سازه‌های بتن مسلح با قاب خمشی سه‌بعدی از پیوند سازگار بین دو نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ با قابلیت دستورپذیری همراه

قوی پرداخته شد. [۴] و طی پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۳، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود MSC-MARC مبتنی بر مدل المان فینیر- تیر، مدل المان پوسته‌ی چندلایه و روش غیرفعال کردن المان‌ها به شبیه‌سازی روند فروریختن سازه‌های بلند بتن مسلح، در معرض زلزله‌ی شدید پرداخته شد و طی آن، فرایند فروریختن یک ساختمان قاب خمشی ۱۰ طبقه‌ی بتن مسلح و دو ساختمان بلند ۱۸ و ۲۰ طبقه‌ی بتن مسلح با سیستم قاب محیطی و هسته‌ی مرکزی تحت معیارهای گسیختگی مختلف بررسی شدند. [۵] همچنین در سال ۲۰۱۶، با استفاده از نرم‌افزار مذکور، رفتار مکانیکی ساختمان‌های فوق بلند بتن مسلح تحت آتش‌سوزی شبیه‌سازی شد. [۶] در سال ۲۰۱۶ نیز به منظور مطالعه‌ی عملکرد مقاومت در برابر فروپاشی پیش‌رونده‌ی سیستم‌های کف بتن مسلح، ۷ نمونه‌ی آزمایشگاهی در مقیاس ۱/۳ شامل ۵ نمونه‌ی تیر- دال و ۲ نمونه‌ی تیر بدون دال تحت بارگذاری یک طرفه و با در نظر گرفتن آثار ابعاد تیرها و دال‌ها آزمایش شدند. [۷] همچنین در سال ۲۰۱۶، با استفاده از تجزیه و تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی، مقاومت در برابر فروپاشی پیش‌رونده‌ی قاب بتن مسلح تحت سناریوهای مختلف حذف ستون در طبقات مختلف بررسی شد. [۸]

در نوشتار حاضر، روند پیشرفت تخریب و فروریختن یک سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی بتن مسلح با قاب خمشی سه‌بعدی، تحت ۴ حالت مختلف برای حذف ستون‌های طبقه‌ی همکف به کمک نرم‌افزار ساخته‌شده در محیط ویزوال بیسیک<sup>۴</sup> به‌عنوان ابزاری دستوردهنده با فایل‌های کتابخانه‌ی ویژه و قابلیت خروجی قابل استفاده برای کاربران مدل‌سازی شده است. نرم‌افزار مذکور برای تحلیل سازه در هر مرحله از تخریب اعضا و تشکیل هندسه‌ی جدید برای سازه، از نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ با قابلیت دستورپذیری همراه با موتور تحلیلی قدرتمند استفاده می‌کند. با توجه به معیارهای تسلیم و خرابی تعریف‌شده برای اعضا، در هر مرحله از فروریختن، برخی از اعضا از مدل سه‌بعدی حذف و در صورتی که مدل سازه‌ی اصلاح‌شده ناپایدار نباشد، نیروهای داخلی آن تحت بارگذاری مفروض تعیین و در صورت لزوم بار دیگر، برخی از اعضا حذف و مدل سازه اصلاح می‌شود. این مراحل تا آنجا که دیگر نیاز به حذف عضوی از سازه و اصلاح مدل نباشد (توقف فرو ریختن اعضا سازه‌ی) و یا تمامی سازه فرو بریزد، ادامه می‌یابد. نرم‌افزار ساخته‌شده قادر است در مقیاس میکروسکوپی و در زمانی کوتاه، شمای کلی فروریختن ساختمان را ارائه کند و از آن می‌توان برای پیش‌طراحی در تخریب‌های کنترل‌شده استفاده کرد و پس از حصول طرح اولیه‌ی مناسب در صورت دسترس بودن نرم‌افزارهای پیشرفته مانند ELS<sup>۵</sup>، با استفاده از آن‌ها و صرف زمان بیشتر، می‌توان جزئیات و شمای دقیق‌تری از فروریختن ساختمان به‌دست آورد.

### ۲. مروری بر چند نرم‌افزار شبیه‌ساز روند تخریب سازه‌ها

وجود ابر رایانه‌های پرسرعت در عصر کنونی، تحلیل سازه‌های بزرگ و پیچیده و بررسی رفتار آن‌ها را با تقریب‌های مناسبی نسبت به واقعیت میسر ساخته‌اند. شبیه‌سازی روند تخریب سازه‌ها و اعمال بارگذاری‌های فوق‌العاده بر روی سازه، جزء آن دسته از مواردی است که در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه بسیاری از شرکت‌های تولیدکننده‌ی نرم‌افزارهای شبیه‌ساز رفتار سازه قرار گرفته است. شرکت بین‌المللی علوم کاربردی<sup>۶</sup> که از جمله شرکت‌های پیشرو در این زمینه است، کار خود را از سال ۲۰۰۳ با ساخت نرم‌افزار شبیه‌ساز روند تخریب قاب دو‌بعدی آغاز کرد که خود توجیه‌گر ارزش پژوهش انجام‌شده است. شرکت مذکور در آخرین نسخه از نرم‌افزار

سازه به کار می رود (روابط ۱ الی ۳):

$$DRR = \frac{M_{max}}{M_r} \quad \text{در تیرها (فقط نیروی خمشی)} \quad (۱)$$

$$DRR = \frac{M_{max}}{M_r(N)} \quad \text{در ستون ها (اندرکنش نیروی محوری و خمشی)} \quad (۲)$$

که در آن ها،  $M_{max}$  بیشینه ی لنگر خمشی وارده،  $M_r$  لنگر مقاوم و  $N$  نیروی محوری است. یا:

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{Q_{CE}} \quad (۳)$$

که در آن،  $Q_{UD}$  نیروی فعال (تقاضا) به دست آمده در هر المان (شامل ممان، نیروی محوری، برش و نیروهای ترکیبی دیگر) و  $Q_{CE}$  ظرفیت نهایی مورد انتظار با ضریب ۱ برای هر المان (شامل ممان، نیروی محوری، برش و نیروهای ترکیبی دیگر) است. طبق آیین نامه های GSA و UFC برای سازه های بتن مسلح نباید مقدار DRR یا DCR اعضاء سازه از ۲۰۰٪ تجاوز کند. در غیر این صورت اعضاء به شدت آسیب می بینند و در معرض فروپاشی پیش رونده قرار می گیرند. [۱۴، ۱۳]

آیین نامه ی FEMA-۳۵۶ با توجه به اهمیت ساختمان و کارایی آن بعد از وقوع زمین لرزه، آسیب های احتمالی را تقسیم بندی و سطوح بهسازی را بر این اساس تعریف کرده است. آیین نامه ی مذکور کل ساختمان را به دو گروه اجزاء سازه یی و غیرسازه یی تقسیم بندی کرده و برای هر کدام از اجزاء سازه یی و غیرسازه یی، یک سری معیارها از سطح کارکرد کامل تا خرابی های زیاد برای یک زلزله با دوره ی بازگشت معین در نظر گرفته است. سطوح عملکرد ساختمان بر مبنای عملکرد اجزاء سازه یی و غیرسازه یی تعریف می شود. منظور از اجزاء سازه یی، ستون ها، تیرها، بادبند ها، دیوارهای بتنی، دیوارهای پرکننده با مصالح بتنی غیرمسلح، پی ها، دیافراگم ها و عناصر مشابه است.

معیارهای سطح عملکرد اجزاء سازه یی با توجه به نوع سیستم سازه یی و اصلی یا غیراصلی بودن عضو و همچنین تغییرمکان جانبی گذرا و ماندگار تقسیم بندی می شوند. سطوح عملکرد اجزاء سازه یی در ۳ سطح قابلیت استفاده یی بوقه ۱۵، ایمنی جانی<sup>۱۶</sup> و آستانه ی فروریزش<sup>۱۷</sup> طبقه بندی شده اند. در سطح عملکرد آستانه ی فروریزش، ساختمان دچار خرابی های گسترده و فراوانی می شود. اگر سازه دچار تغییرمکان هایی بیش از این حد شود، سازه ناپایدار می شود و فرو می ریزد.

رفتار اعضاء سازه یی تحت اثر بارهای زلزله در آزمایشگاه به وسیله ی نیروهای رفت و برگشتی مدل سازی می شود و با استفاده از نمودار هیستریزس که نشان دهنده ی نمودار بار-جابه جایی است، ارزیابی می شود. منحنی به دست آمده از تقاطع چرخه های هیستریزس با یکدیگر، نشان دهنده ی مدل چندخطی رفتار اعضاء تحت اثر بارهای رفت و برگشتی است. بیشتر آیین نامه ها و نرم افزارهای رایانه یی به منظور ساده سازی رفتار اعضاء از مدل چندخطی برای مدل سازی استفاده می کنند (شکل ۲). چنانچه میزان جابه جایی یا دوران انتهای اعضاء بتن مسلح از معیارهای پذیرش برای تیرها و ستون های بتن مسلح مطابق جدول های ۶-۷ و ۶-۸ آیین نامه ی FEMA-۳۵۶ تجاوز کند و از حد مربوط به سطح عملکرد آستانه ی فروریزش فراتر رود، سازه ناپایدار می شود و فرو می ریزد. [۱۵]

با موتور تحلیلی و نرم افزار ویزوال بیسیک<sup>۱۱</sup> به عنوان ابزاری دستوردهنده با فایل های کتابخانه یی ویژه و قابلیت خروجی قابل استفاده برای کاربران استفاده شده است. نحوه ی عملکرد نرم افزار شبیه ساز به این صورت قابل بیان است:

۱. مدل سازی سازه در نرم افزار SAP۲۰۰۰.
  ۲. وارد کردن شماره ی عضو یا اعضاء موردنظر جهت حذف فضای ویزوال بیسیک و شروع عملیات.
  ۳. تحلیل اولیه ی سازه بدون هیچ گونه حذف عضو و دریافت مشخصات سازه یی و نیروهای داخلی تمام اعضاء.
  ۴. حذف عضو یا اعضاء موردنظر از سازه و جایگزین شدن نیروهای داخلی آن ها به صورت عکس العمل در گره های انتهایی.
  ۵. طی  $n$  مرحله، نیروهای عکس العمل به صفر می رسد و در هر یک از مراحل  $n$  گانه، سازه تحلیل و نتایج تحلیل دریافت و ذخیره می شود.
  ۶. در هر یک از مراحل تحلیل، اعضایی که معیارهای خرابی را ارضاء کنند، حذف و مدل سازه یی اصلاح می شود.
  ۷. این مراحل تا آنجا که فرو ریختن اعضاء سازه یی متوقف شود و یا تمامی سازه فرو بریزد، ادامه می یابد (مراحل  $n$  گانه پایان می یابد).
  ۸. در نهایت عملیات نرم افزار متوقف می شود و کاربر می تواند شماره ی عضو یا اعضاء دیگری را جهت حذف وارد کند.
- عامل ریزش آوار، تماس و برخورد اعضاء شکست خورده با اعضاء سالم در نرم افزار مذکور در نظر گرفته نشده است. تمامی مراحل تحلیل سازه، اطلاعات اعضاء، روند تشکیل مفاصل خمیری و حذف اعضاء به صورت فایل متنی خروجی ذخیره سازی می شود. گوشه یی از این اطلاعات به صورت نمودار نمایش داده شده است که قابل تفسیر و بررسی است. همچنین در هر مرتبه ی تحلیل، از سازه ی تغییرشکل یافته، عکس برداری شده و با قرار دادن تصاویر مذکور در کنار هم، یک فیلم پویانمایی شده از حذف اعضاء و فروریزش سازه تهیه شده است. با روش ذکر شده تلاش شده است تا یک شبیه سازی منطقی از روند فروریزش سازه به دست آید.

## ۴. اصول و مبانی حذف اعضا در شبیه سازی تخریب

### سازه

#### ۱.۴. معیار حذف اعضا

آیین نامه های GSA۲۰۰۳ و UFC، اطلاعات و دستورالعمل های دقیقی را براساس روش مسیر بار جایگزین<sup>۱۲</sup> با هدف بالا بردن مقاومت سازه ها در برابر فروریزی پیش رونده ارائه داده اند. در روش مذکور، پتانسیل وقوع فروریزی پیش رونده در سایر تیرها و ستون ها از طریق سناریوی حذف یک یا تعداد بیشتری ستون ارزیابی می شود. نتایج آنالیزکشنان خطی به صورت نسبت تقاضا به مقاومت<sup>۱۳</sup>، یا نسبت تقاضا به ظرفیت<sup>۱۴</sup>، محاسبه می شود و عضو یا رسیدن به مقدار DRR یا DCR مشخصی از بین خواهد رفت و نیروهای انتهایی آن بازتوزیع خواهند شد. در واقع استفاده از نسبت DRR یا DCR به عنوان یک معیار برای تعیین خرابی در اعضاء اصلی

پیشرفت خرابی تعمیم داده شده است. با روش مذکور، نتایج بهتری در اختیار کاربر قرار می‌گیرد و او می‌تواند از وضعیت کلی مدل و نتایج خروجی حاصل از تحلیل قبل از حذف عضو، حین حذف عضو و بعد از حذف عضو مطلع شود.

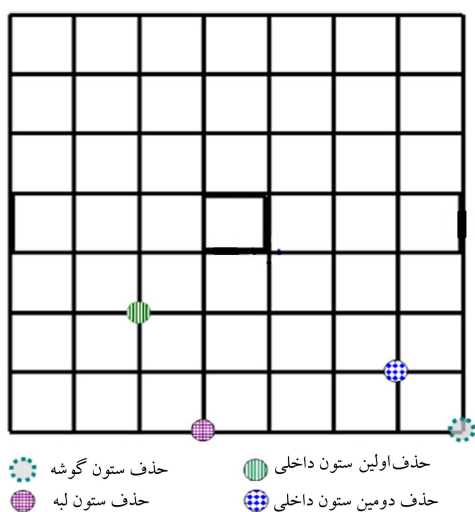
## ۵. صحت‌سنجی نرم‌افزار شبیه‌ساز

جهت اطمینان از عملکرد نرم‌افزار شبیه‌ساز در تحلیل‌های پی‌درپی و بررسی صحت الگوریتم استفاده‌شده در نرم‌افزار، نتایج حاصل از به‌کارگیری آن با نتایج حاصل از یک پژوهش در مقیاس واقعی و دو پژوهش که در آن از نرم‌افزار پیشرفته‌ی ELS استفاده شده، مقایسه شده است. ابتدا مدل موجود در پژوهش‌های مورد بررسی طبق مشخصات سازه‌یی و مصالح ذکر شده در آن‌ها در نرم‌افزار SAP2000 ایجاد و سپس با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز، سناریوهای ذکر شده در پژوهش‌ها به صورت مشابه روی مدل‌ها اجرا شدند و نتایج حاصل با نتایج پژوهش‌های مورد نظر مقایسه شده است. در بخش حاضر، یک سازه‌ی ۱۰ طبقه، یک سازه‌ی ۵ طبقه و یک سازه‌ی ۳ طبقه‌ی بتن مسلح بررسی شده است.

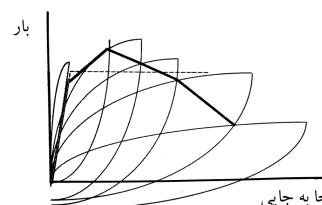
### ۱.۵. ساختمان ۱۰ طبقه

در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، یک سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی بتن مسلح طبق آیین‌نامه‌ی ACI318-08 در نرم‌افزار ELS که مبتنی بر روش المان کاربندی است، مدل‌سازی و در بخشی از پژوهش مذکور به ارزیابی فروپاشی پیش‌رونده‌ی قاب سه‌بعدی بدون دال مطابق آیین‌نامه‌ی UFC پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، موارد مورد بررسی در بخش کنونی شامل حذف ستون گوشه، ستون لبه و دو ستون داخلی در طبقه‌ی همکف است.<sup>[۱۸]</sup>

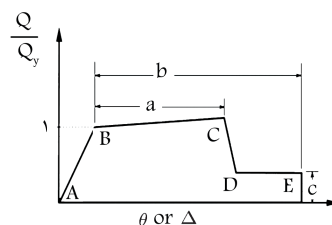
مجموعه تصاویری که در شکل ۵الف ملاحظه می‌شود، حالت تخریب‌شده‌ی ساختمان مذکور در اثر حذف و تخریب اولیه‌ی اعضا معینی از آن را نشان می‌دهد. مجموعه‌ی تصاویر نشان داده‌شده در شکل ۵ب، وضعیت مشابه تخریب‌شده‌ی ساختمان که از نرم‌افزار ساخته‌شده در پژوهش حاضر به دست آمده است، را نشان می‌دهد. به طوری که ملاحظه می‌شود، تخریب تیرها در سناریوهای مشابه مربوط به



شکل ۴. جانمایی ستون‌های حذف‌شده در پلان سازه طی سناریوهای مختلف.<sup>[۱۸]</sup>

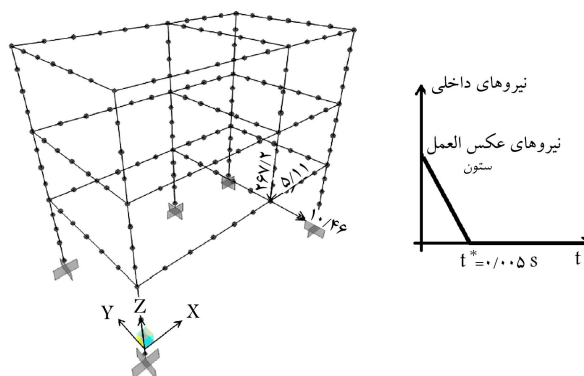


الف) مدل رفتاری واقعی عضو به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی؛



ب) نمودار نرمالیزه شده‌ی بار - جاب‌جایی یا لنگر - دوران براساس آیین‌نامه‌ی FEMA/۳۵۶<sup>[۱۹]</sup>

شکل ۲. نمودار جاب‌جایی - بار در بارگذاری رفت و برگشتی و نمودار ساده سازی شده اعضا با مصالح کشسان - خمیری.

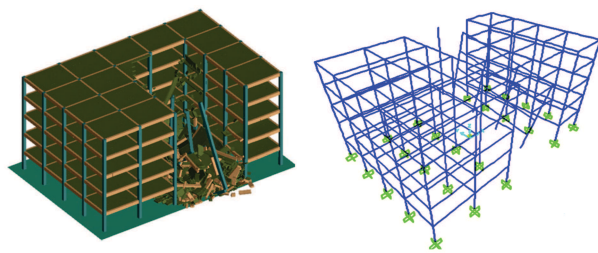


شکل ۳. نمایش بار معادل حذف ستون و کاهش آن طی یک تابع خطی در روند تحلیل.<sup>[۱۷]</sup>

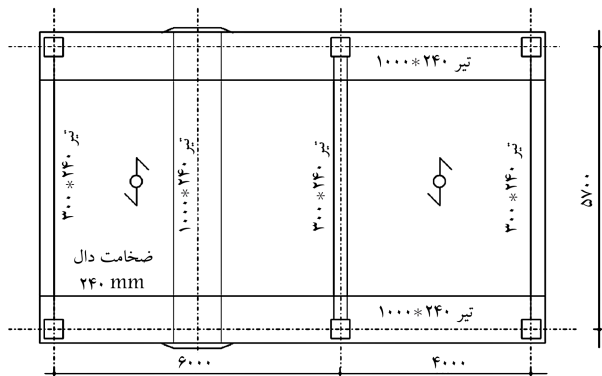
### ۲.۴. نحوه‌ی حذف اعضا در روند تحلیلی شبیه‌سازی

یکی از مسائل مهمی که باید در روند تحلیلی شبیه‌سازی فروریختن سازه به آن توجه ویژه شود، بحث حذف ستون‌ها یا المان‌های باربر اصلی است. اساساً برای شبیه‌سازی درست و نزدیک شدن به شرایط واقعی از فروریختن سازه باید در حذف اعضا شرایطی اعمال شود تا روند تخریب در مدل تحلیلی قابل لمس باشد و کاربر شرایط تخریب و تغییر شکل‌های سازه‌ی مورد تخریب را به مرور و گام به گام ملاحظه کند. لذا به منظور نزدیک شدن به هدف مذکور و داشتن یک تحلیل گام به گام از بررسی مدل به وسیله‌ی نرم‌افزار شبیه‌ساز، از مطالعات انجام‌شده‌ی پیشین،<sup>[۱۷، ۱۶]</sup> در زمینه‌ی روش حذف ستون‌ها استفاده شد و در یک گام جلوتر، روش مذکور به تمام اعضا مورد حذف تعمیم داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در روش مذکور از بار معادل همان ستون حذف‌شده استفاده می‌شود که طی یک تابع خطی به سازه اعمال می‌شود. زمان سپری‌شده جهت حذف عضو به  $n$  قسمت تقسیم می‌شود و نیروهای معادل جایگزین شده‌ی عضو یا اعضا حذف‌شده طی  $n$  مرحله به صفر می‌رسد و همان‌طور که گفته شد، روش مذکور به تمام اعضا حذف‌شده طی





الف) پیش بینی وضعیت تخریب شده ی ساختمان به (ب) پیش بینی وضعیت تخریب شده ی کمک نرم افزار ساخته شده در پژوهش حاضر؛ ساختمان توسط مرجع [۱۹].  
شکل ۷. مقایسه وضعیت نحوه تخریب ساختمان ۵ طبقه بتن مسلح با دال بتن مسلح با دو نرم افزار.



شکل ۸. پلان ساختمان ۳ طبقه جهت بررسی تخریب پیش رونده. [۱۷]

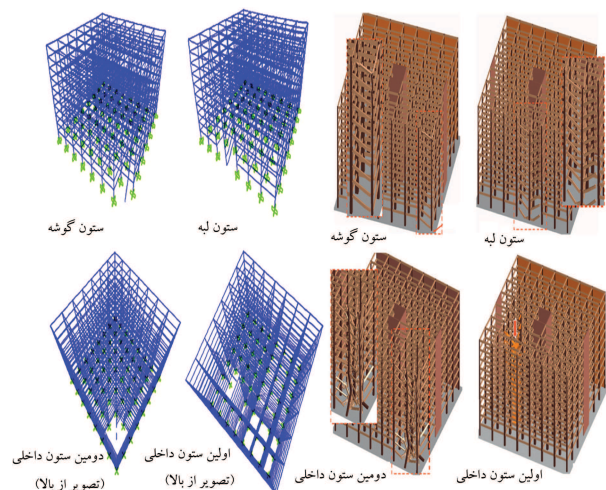


الف) حذف اولین ستون مرکزی؛ ب) حذف دومین ستون مرکزی؛ ج) حذف ستون گوشه.  
شکل ۹. تصاویر واقعی تغییر شکل های ساختمان در مراحل مختلف حذف ستون ها در طبقه همکف.

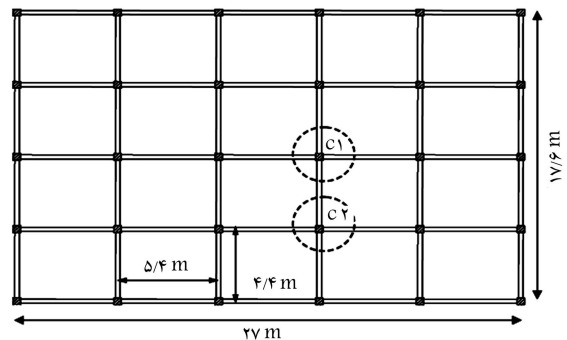
### ۳.۵. ساختمان ۳ طبقه

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲، مقاومت یک ساختمان بتن مسلح قاب - دال تخت ۳ طبقه در مقیاس واقعی در آزمایشگاه در برابر فروریزش پیش رونده بررسی شد و با انجام مطالعه ی عددی، پاسخ سازه در ۳ حالت مختلف که در آن ۳ ستون مختلف حذف می شوند، پیش بینی شد. [۱۷] شکل ۸، پلان ساختمان موضوع مطالعه را نشان می دهد که برای تخریب سازه ی مذکور تحت اثر وزن خود از یک ماشین هیدرولیکی استفاده شده است.

روند تخریب به این صورت است که ابتدا دو ستون مرکزی در طبقه ی همکف به صورت جداگانه تخریب می شوند. در این مرحله سازه در مقابل فروریزش مقاومت می کند، ولی با تخریب ستون سوم از دهانه ی ۴ متری، سازه فرو می ریزد (شکل ۹). سازه ی مورد مطالعه با مشخصات ذکر شده بدون دال بتنی به وسیله ی نرم افزار شبیه ساز مدل سازی شده است. بار مربوط به دال های بتنی که در نرم افزار مذکور مدل سازی نشده اند، به طور جداگانه بر روی تیرهای در قاب مدل سازی شده وارد شده است.



الف) تصاویر مربوط به مرجع [۱۸]؛ ب) تصاویر مربوط به نرم افزار محصول پژوهش حاضر.  
شکل ۵. مقایسه نحوه فروریزش یک ساختمان ۱۰ طبقه برای اشکال مختلف تخریب ستون ها در طبقه همکف.



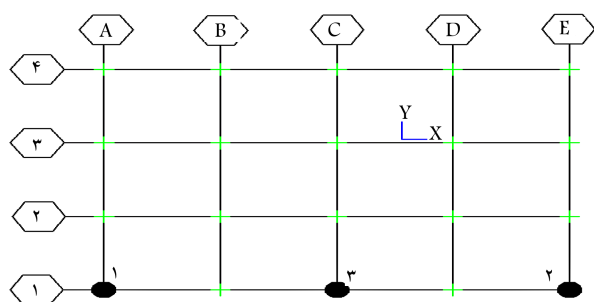
شکل ۶. جانمایی ستون های حذف شده در پلان سازه. [۱۹]

شکل های الف و ب تقریباً یکسان است، ولی در مورد حذف دومین ستون داخلی، چون نرم افزار ساخته شده قابلیت شبیه سازی ریزش آوار و برخورد آن با قسمت های باقی مانده ی سازه را ندارد، تفاوت هایی مشاهده می شود.

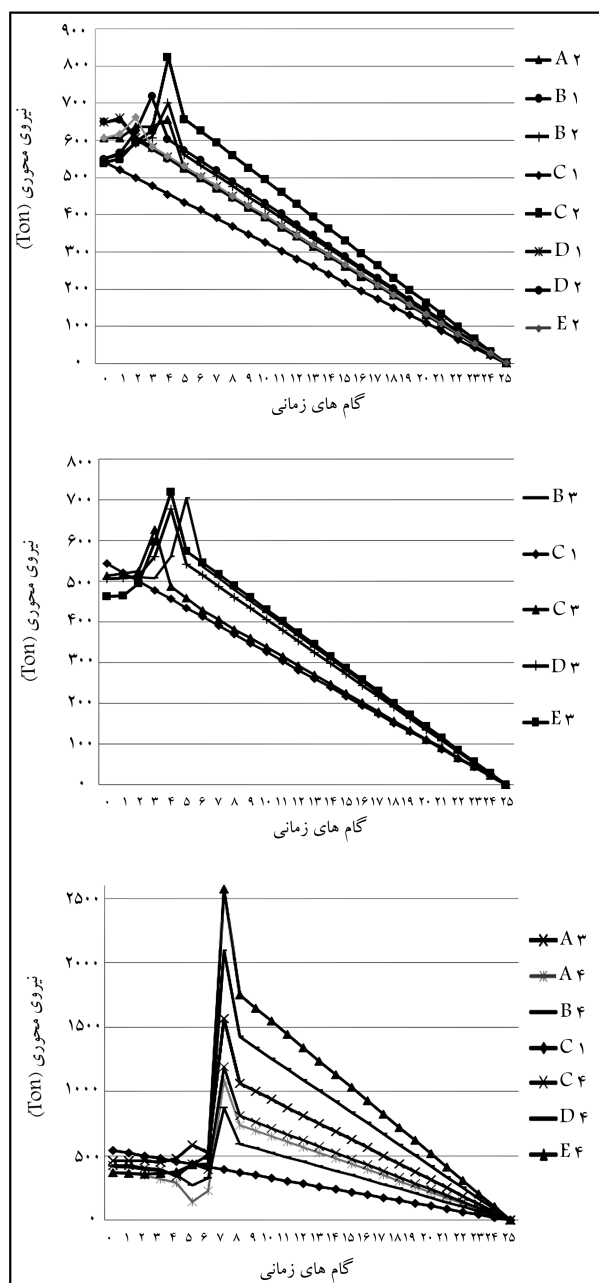
### ۲.۵. ساختمان ۵ طبقه

در سال ۲۰۱۱، یک سازه ی ۵ طبقه ی بتن مسلح با دال بتنی مشابه با بخش قبل به روش المان کاربردی تحت نرم افزار ELS بررسی و مقاومت آن در برابر فروپاشی پیش رونده در اثر حذف دو ستون داخلی C۱ و C۲ که جانمایی آن ها در شکل ۶ نمایش داده شده، ارزیابی شده است. [۱۹]

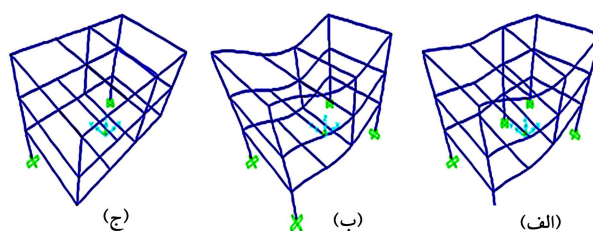
مدل مورد نظر با مشخصات ذکر شده بدون دال بتنی به وسیله ی نرم افزار شبیه ساز بررسی شد. شکل های الف و ب، به ترتیب پیش بینی وضعیت تخریب شده ی ساختمان را پس از حذف ستون های C۱ و C۲ توسط نرم افزار ساخته شده در پژوهش حاضر و تحقیقی دیگر [۱۹] نشان می دهند. به طوری که ملاحظه می شود، تصویر مربوط به پیش بینی وضعیت تخریب شده ی ساختمان توسط نرم افزار مورد بحث، شباهت زیادی به نتایج به دست آمده توسط سالم و همکاران [۱۹] دارد. در توضیح تفاوت در شکل فروریزش ها نیز می توان گفت وجود دال بتنی مقاومت سازه را در برابر فروپاشی افزایش می دهد، بنابراین میزان فروریزش سازه در مرجع [۱۹] نسبت به نرم افزار شبیه ساز کمتر است.



شکل ۱۱. پلان راهنمای نام‌گذاری ستون‌های طبقه‌ی همکف و جانمایی ستون‌های حذف‌شده در سناریوی اول فرو ریزش جهت‌دار سازه.



شکل ۱۲. تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون تخریب‌شده‌ی C۱ در حین پیشرفت خرابی.



شکل ۱۰. وضعیت سازه‌ی مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار شبیه‌ساز.

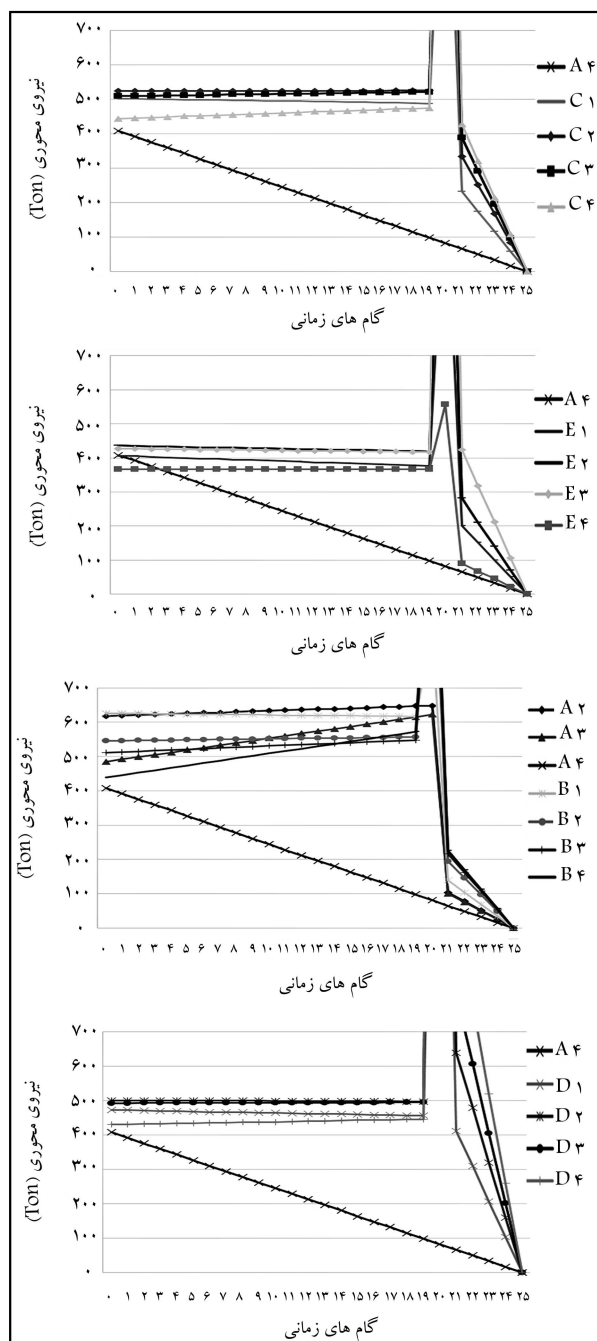
شکل ۱۰، تصویر مربوط به وضعیت تخریب‌شده‌ی سازه پس از حذف دو ستون مرکزی و پس از حذف ستون سوم را نشان می‌دهد. به طوری که ملاحظه می‌شود، سازه پس از حذف دو ستون مرکزی در مقابل فرو ریزش مقاومت کرده و پس از حذف ستون سوم فرو ریخته است.

## ۶. تأثیر موقعیت ستون‌های تخریب‌شده‌ی اولیه بر روی نحوه‌ی گسترش خرابی

در بخش حاضر، نحوه‌ی فرو ریزش یک سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی بتن مسلح تحت ۴ سناریوی مختلف حذف ستون‌های طبقه‌ی همکف که در برگزیده‌ی اصلی‌ترین حالت‌های تخریب کنترل‌شده‌ی ساختمان مذکور است، بررسی شده است. مراحل فرو ریزش سازه، تغییر شکل سازه و روند حذف ستون‌های طبقه‌ی همکف به صورت تصویر و نمودار به عنوان خروجی‌های حاصل از عملکرد نرم‌افزار شبیه‌ساز ارائه و بررسی شده است. سازه‌ی مورد مطالعه، یک سازه‌ی قاب خمشی سه‌بندی بتن مسلح ۲۰ طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳/۶ متر و ۳ دهانه در راستای  $y$  و ۴ دهانه در راستای  $x$  با طول هر دهانه، ۵ متر است. محل احداث سازه در شهر تهران و کاربری آن مسکونی فرض شده است. سازه با بارهای مرده و زنده‌ی ۵۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع طراحی شده است که به صورت خطی روی تیرهای قاب وارد می‌شوند. وزن سازه به طور خودکار توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. بارگذاری طبق مبعد ششم مقررات ملی ساختمان<sup>[۲۰]</sup> و استاندارد ۲۸۰۰<sup>[۲۱]</sup> صورت گرفته و طراحی طبق مبعد نهم مقررات ملی ساختمان، انجام شده است.<sup>[۲۲]</sup> خاک از نوع II و شتاب مبنای طرح،  $g/3.5$  است. ضریب ترک‌خوردگی برای ممان اینرسی تیر و ستون به ترتیب ۷/۰ و ۳۵/۰ اعمال شده است. مقاومت فشاری بتن مصرفی،  $kg/cm^2/3.0$  و مقاومت کششی تسلیم فولاد میلگرد مصرفی،  $kg/cm^2/42.0$  و مقاومت نهایی آن،  $kg/cm^2/63.0$  فرض شده است. مدول کشسانی بتن،  $kg/cm^2/275.0$  و فولاد،  $kg/cm^2/1.0 \times 10^6$  است. در طراحی مدل معیار، تغییر مکان جانبی نسبی کنترل‌کننده است و مقدار بیشینه‌ی آن، ۲۸/۰٪ است. مقطع ستون‌ها، مربع و میلگردها به طور مساوی در ۴ وجه آن توزیع شده‌اند. مقطع تیرها، مستطیل و میلگردها در بالا و پایین مقطع قرار دارند. ابعاد سطح مقطع تیرها و ستون‌ها و درصد میلگرد ستون‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

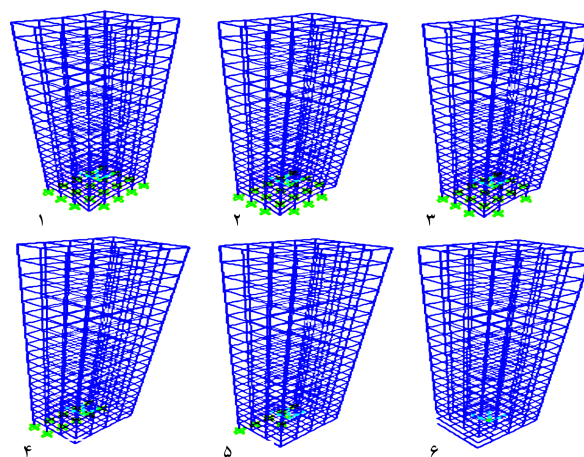
## ۱.۶. سناریوی اول فرو ریزش جهت‌دار سازه

در اولین سناریو، ستون‌های A۱، E۱ و C۱ مطابق شکل ۱۱ به ترتیب از طبقه‌ی همکف حذف می‌شوند. تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون‌های تخریب‌شده‌ی A۱ و E۱ نشان می‌دهد که سازه باز توزیع نیروها را تحمل می‌کند و ستون دیگری تخریب نمی‌شود، اما با توجه به آنچه که در نمودارهای شکل ۱۲

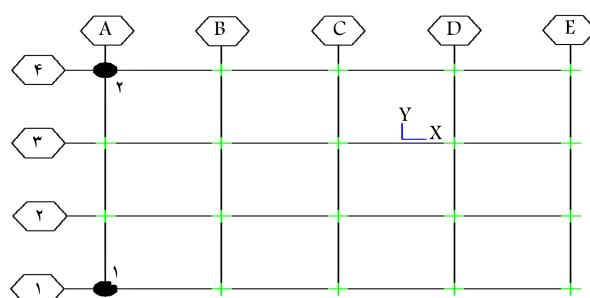


شکل ۱۵. تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون تخریب‌شده A4 در حین پیشرفت خرابی.

که در نمودارهای شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با قرار گرفتن ستون A4 در فرایند تخریب، سازه دیگر قادر به تحمل بارهای باز توزیع شده نیست و ابتدا ستون‌های قرار گرفته در راستاهای A و B از پلان سازه که به ستون‌های حذف شده نزدیک‌تر هستند، تخریب می‌شوند و سپس خرابی به ستون‌هایی که در راستاهای C، D، E و از پلان سازه قرار دارند، سرایت می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این سناریو سازه پس از حذف دو ستون شروع به فرو ریزش می‌کند، در حالی که در سناریوی قبل، سازه پس از حذف ۳ ستون دچار فرو ریزش شد؛ بنابراین می‌توان گفت افزایش تعداد دهانه‌های سازه در کاهش حساسیت آن به فرو ریزش کلی، مؤثر است.



شکل ۱۳. روند تخریب ستون‌های طبقه‌ی همکف سازه‌ی موردنظر طی حذف ستون‌های A1، E1 و C1.



شکل ۱۴. پلان راهنمای نام‌گذاری ستون‌های طبقه‌ی همکف و جانمایی ستون‌های حذف‌شده در سناریوی دوم فرو ریزش جهت‌دار.

مشاهده می‌شود، با قرار گرفتن ستون C1 در فرایند تخریب، سازه دیگر قادر به تحمل بارهای باز توزیع شده نیست و ابتدا ستون‌های قرار گرفته در محورهای ۱ و ۲ از پلان سازه که به ستون‌های حذف شده نزدیک‌تر هستند، تخریب می‌شوند و سپس خرابی به ستون‌هایی که در راستاهای محورهای ۳ و ۴ از پلان سازه قرار دارند، سرایت می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هر چه خرابی پیشرفت می‌کند و از تعداد ستون‌های باقی‌مانده کاسته می‌شود، نرخ پرش و افزایش نیروی محوری در ستون‌های باقی‌مانده بیشتر می‌شود.

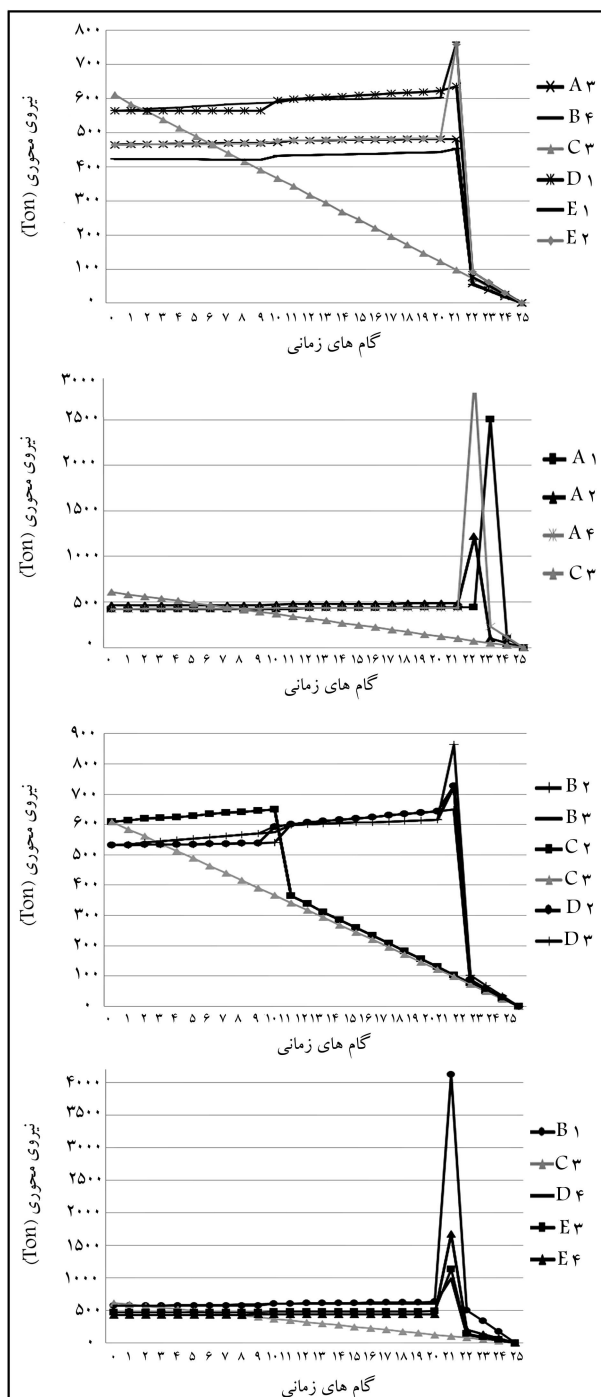
نتایج حاصل از تحلیل نمودارها و مشاهده‌ی روند تخریب سازه در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که سازه پس از حذف ستون C1 باز توزیع نیروها را تحمل نمی‌کند و اعضایی که توانایی تحمل نیروهای اضافی تولید شده را ندارند، شروع به حذف شدن می‌کنند و با حذف تمامی ستون‌های طبقه‌ی همکف طبق ترتیب مشاهده شده، سازه‌ی موردنظر در همان سمتی که ستون‌ها عمداً حذف شدند، فرو می‌ریزد.

## ۲.۶. سناریوی دوم فرو ریزش جهت‌دار سازه

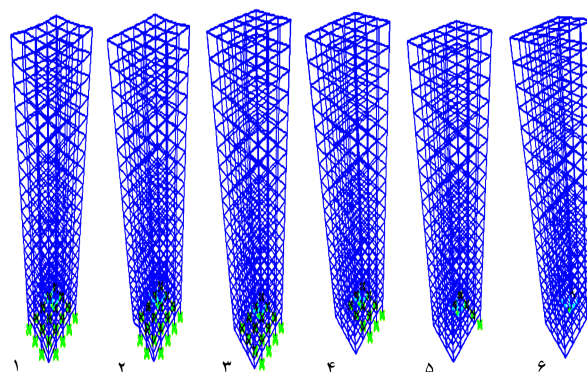
در سناریوی دوم فرو ریزش جهت‌دار، ستون‌های A1 و A4 مطابق شکل ۱۴ به ترتیب از طبقه‌ی همکف حذف می‌شوند. تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون تخریب‌شده A1 نشان می‌دهد که سازه، باز توزیع نیروها را تحمل می‌کند و ستون دیگری حذف نمی‌شود. در این مرحله نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون‌های حذف شده افزایش، در ستون‌های میانی تقریباً بدون تغییر و در ستون‌های سمت دیگر از پلان سازه به علت کشش، کمی کاهش می‌یابد؛ اما با توجه به آنچه

جدول ۱. مشخصات مقاطع و تیپ‌بندی تیر و ستون.

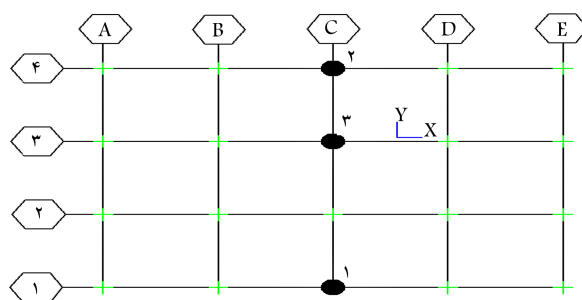
تعداد طبقات	شماره‌ی طبقات	ابعاد تیر ( $C \times m^2$ )	ابعاد ستون ( $C \times m^2$ )	مقدار میلگردها ستون ( $C \times m^2$ )	درصد میلگردها ستون
۲۰	۱-۵	$60 \times 90$	$90 \times 90$	۸۵	۱٫۰۵
	۶-۱۰	$60 \times 85$	$85 \times 85$	۷۴	۱٫۰۲
	۱۱-۱۵	$60 \times 80$	$80 \times 80$	۶۴٫۳	۱٫۰۱
	۱۶-۲۰	$60 \times 75$	$75 \times 75$	۵۶٫۵	۱٫۰۱



شکل ۱۸. تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون تخریب‌شده‌ی C۳ در حین پیشرفت خرابی.



شکل ۱۶. روند تخریب ستون‌های طبقه‌ی همکف سازه‌ی موردنظر طی حذف ستون‌های A۱ و A۴.



شکل ۱۷. پلان راهنمای نام‌گذاری ستون‌های طبقه‌ی همکف و جانمایی ستون‌های حذف‌شده در سناریوی فروریزش به شکل عمودی و در داخل سازه.

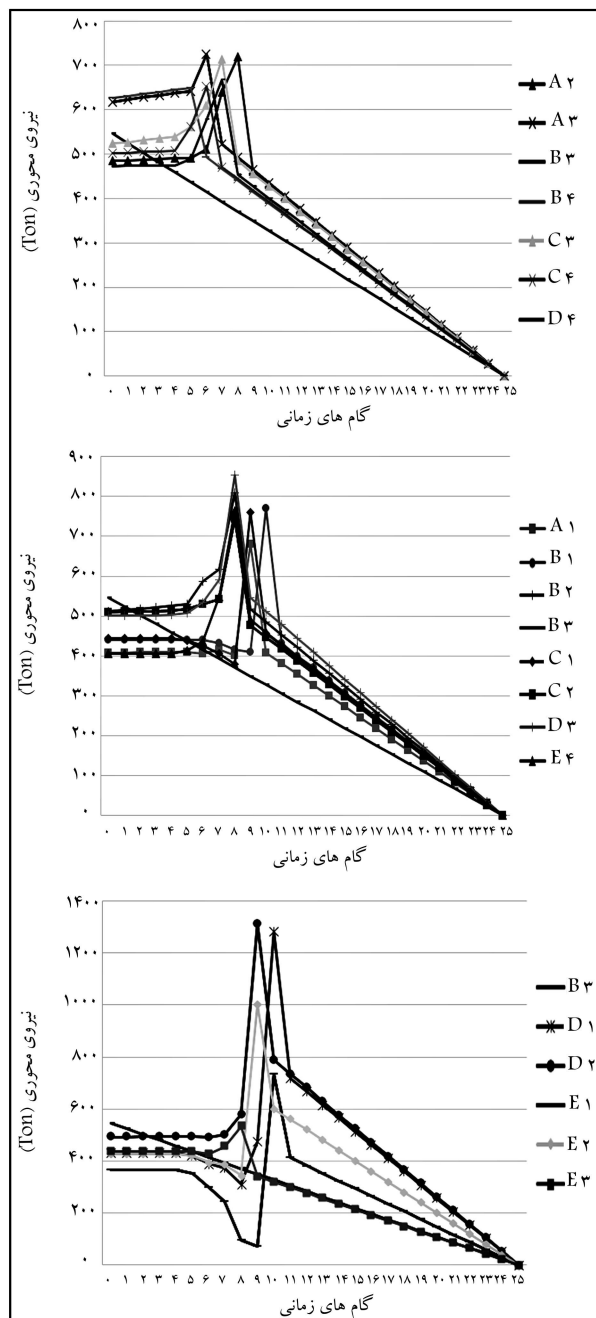
نتایج حاصل از تحلیل نمودارها و مشاهده‌ی روند تخریب سازه در شکل ۱۶ نشان می‌دهد که سازه پس از حذف ستون A۴ بازتوزیع نیروها را تحمل نمی‌کند و اعضایی که توانایی تحمل نیروهای اضافی تولیدشده را ندارند، شروع به حذف شدن می‌کنند و با حذف تمامی ستون‌های طبقه‌ی همکف طبق ترتیب مشاهده‌شده، سازه‌ی موردنظر در همان سمتی که ستون‌های آن عمداً حذف شده‌اند، فرو می‌ریزد.

### ۳.۶. سناریوی فرو ریزش به شکل عمودی و در داخل سازه

به منظور فروریزش سازه به شکل عمودی و در داخل خود سازه با توجه به مشاهدات قبلی این گونه به نظر می‌رسد که با حذف ستون‌های داخلی سازه بتوان به نتیجه مطلوبی رسید. بدین منظور پس از فعال نمودن نرم افزار شبیه ساز ستون‌های داخلی C۱، C۴ و C۳ مطابق شکل ۱۷ به ترتیب از طبقه همکف حذف می‌شوند.

تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون‌های تخریب‌شده‌ی C۱ و C۴ نشان می‌دهد که سازه باز توزیع نیروها را تحمل می‌کند و ستون دیگری تخریب نمی‌شود، اما با توجه به آنچه که در نمودارهای شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، با قرار

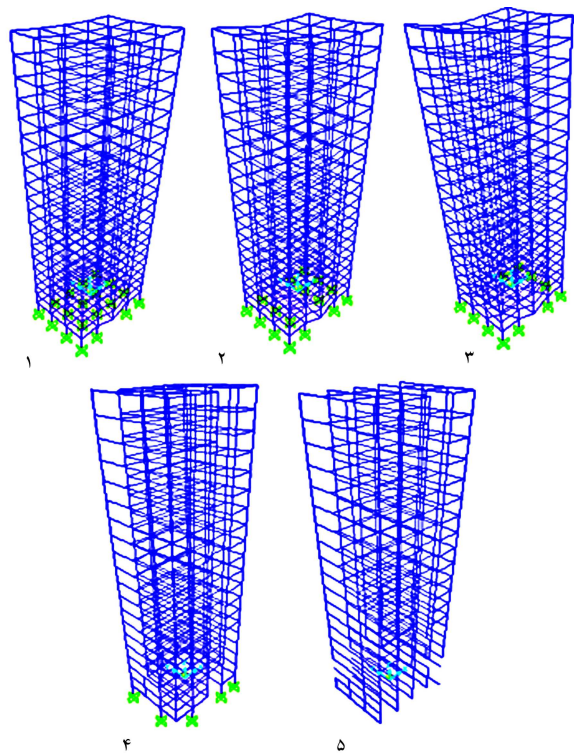




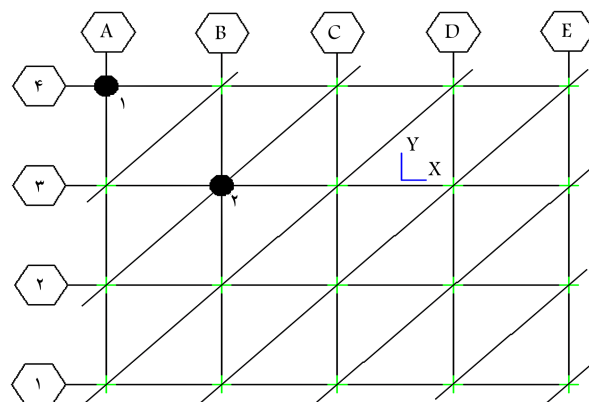
شکل ۲۱. تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون تخریب‌شده B۳ در حین پیشرفت خرابی.

#### ۴.۶. سناریوی فروریزش در گوشه‌ی سازه

جهت تخریب کنترل‌شده‌ی سازه در گوشه، ستون‌های A۴ و B۳ مطابق شکل ۲۰ به ترتیب از طبقه‌ی همکف حذف شده‌اند. تغییرات نیروی محوری در ستون‌های مجاور ستون تخریب‌شده‌ی A۴ نشان می‌دهد که سازه، بازتوزیع نیروها را تحمل می‌کند و ستون دیگری حذف نمی‌شود؛ اما با توجه به آنچه که در نمودارهای شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، با قرار گرفتن ستون B۳ در فرایند تخریب، سازه دیگر قادر به تحمل بارهای بازتوزیع شده نیست و ستون‌های قرار گرفته بر روی خطوط مورب، مطابق شکل ۲۰ از نزدیک ستون‌های تخریب‌شده‌ی A۴ و B۳ شروع به خراب



شکل ۱۹. روند تخریب ستون‌های طبقه‌ی همکف سازه‌ی موردنظر طی حذف ستون‌های داخلی C۱، C۳ و C۴.



شکل ۲۰. پلان راهنمای نام‌گذاری ستون‌های طبقه‌ی همکف و جانمایی ستون‌های حذف شده در سناریوی تخریب کنترل‌شده در گوشه‌ی سازه.

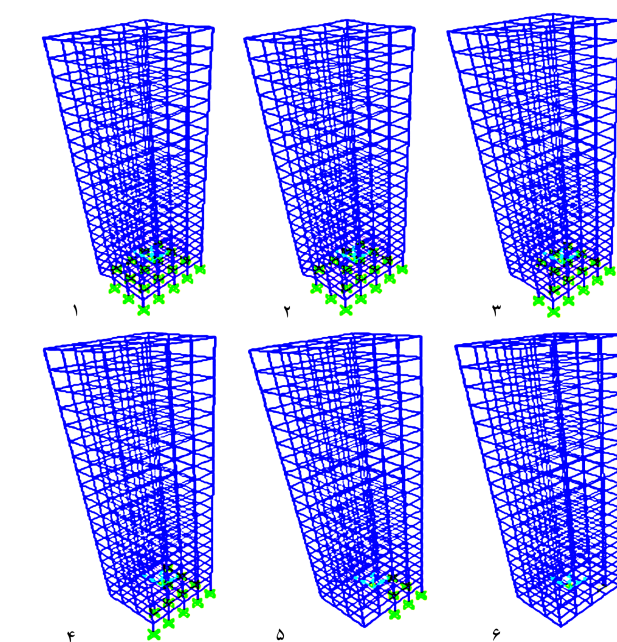
گرفتن ستون C۳ در فرایند تخریب، سازه دیگر قادر به تحمل بارهای بازتوزیع شده نیست و در پی آن ستون C۲ که در بین ستون‌های تخریب‌شده قرار دارد و شرایط آن از همه‌ی ستون‌ها بحرانی‌تر است، تخریب می‌شود. سپس ستون‌های قرار گرفته در مرکز پلان سازه که به ستون‌های تخریب‌شده در راستای C از پلان سازه نزدیک‌ترند، تخریب می‌شوند و در ادامه، خرابی به ستون‌های قرار گرفته در محیط پلان سازه سرایت می‌کند و آن‌ها نیز تخریب می‌شوند.

نتایج حاصل از تحلیل نمودارها و مشاهده‌ی روند تخریب سازه در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که پس از حذف ستون C۳، روند حذف خودکار اعضا شروع می‌شود و ستون‌ها از داخل سازه به سمت خارج سازه شروع به حذف شدن می‌کنند و به نوعی فروریزش سازه به صورت عمودی و در داخل خود سازه را تداعی می‌کنند.

شدن می‌کنند و در نهایت این خرابی به ستون‌های گوشه‌ی طرف دیگر پلان سازه سرایت می‌کند و سازه در گوشه‌ی خود فرو می‌ریزد. نحوه‌ی فرو ریختن سازه در این سناریو در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود.

## ۷. نتیجه‌گیری

پیش‌بینی نحوه‌ی فرو ریختن یک سازه در اثر اعمال بارهای فوق العاده و غیرعادی و یا در اثر تخریب عمدی برخی از اعضاء سازه به کمک مواد منفجره‌ی مخصوص برای تخریب کنترل‌شده‌ی ساختمان از جمله نیازهای روز جامعه‌ی مهندسی است. در پژوهش حاضر، نرم‌افزار شبیه‌سازی نحوه‌ی فرو ریختن سازه‌ها، ارائه و صحت‌سنجی شده است. به کمک نرم‌افزار مذکور، مثال‌های متعددی از تخریب ساختمان‌ها مدل‌سازی و نشان داده شد که با در نظر گرفتن موقعیت مفروض و معینی از ستون‌هایی که برای شروع فرو ریختن ساختمان، عمداً و به کمک مواد منفجره تخریب می‌شوند، می‌توان نحوه‌ی فرو ریختن سازه را پیش‌بینی کرد و بر این اساس موقعیت مناسب و مطلوب ستون‌های تخریب‌شده را به گونه‌ی انتخاب کرد که نحوه‌ی تخریب ساختمان در جهت مطلوب و با صرف کمترین مقدار مواد منفجره هدایت شود. علاوه بر این، از نرم‌افزار مذکور می‌توان برای طراحی بهینه‌ی سازه‌های مقاوم در برابر فرو ریزش پیش‌رونده استفاده کرد.



شکل ۲۲. روند تخریب ستون‌های طبقه‌ی همکف سازه‌ی مورد نظر طی حذف ستون‌های A۴ و B۳.

## پانویس‌ها

1. controlled demolition
2. Progressive collapse
3. multi body analysis
4. visual basic
5. extreme loading for structures
6. applied science international
7. charlotte
8. multi body analysis
9. ABAQUS
10. ANSYS AUTODYNE
11. visual basic microsoft
12. alternative path method
13. demand resistance ratios
14. demand capacity ratios
15. immediate occupancy level
16. life safety level
17. collapse prevention level

## منابع (References)

1. Utagawa, N., Kondo, I., Yoshida, N. and et al. "Simulation of demolition of reinforced concrete buildings by controlled explosion", *Microcomputers in Civil Engineering*, **7**(2), pp. 151-159 (1992).
2. Hartmann, D., Breidt, M., Nguyen, V.V. and et al. "Structural collapse simulation under consideration of uncertainty-fundamental concept and results", *Computers and Structures*, **86**(21-22), pp. 2064-2078 (2008).
3. Yang, G.L., Jiang, L.L. and Huo, C. "Numerical simulation of blasting demolition of 16-storied structure", *2nd International Conference on Digital Manufacturing & Automation* (2011).
4. Lu, X., Lu, Xin., Zhang, W. and et al. "Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes", *Science China Technological Sciences*, **54**, pp. 2549-2560 (2011).
5. Lu, X., Lu, Xin., Guan, H. and et al. "Collapse simulation of reinforced concrete high-rise building induced by extreme earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **42**(5), pp. 705-723 (2013).
6. Lu, X., Li, Y., Guan, H. and et al. "Progressive collapse analysis of a typical super-tall reinforced concrete frame-core tube building exposed to extreme fires", *Fire Technology*, **53**(1), pp. 1-27 (2016).
7. Ren, P., Li, Y., Lu, X. and et al. "Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam-slab substructures under a middle-column-removal scenario", *Engineering Structures*, **118**, pp. 28-40 (2016).
8. Li, Y., Lu, X., Guan, H. and et al. "Numerical investigation of progressive collapse resistance of reinforced concrete frames subject to column removals from different stories", *Advances in Structural Engineering*, **19**(2), pp. 314-326 (2016).
9. <http://www.extremeloading.com>
10. Tagel, D.H. "High fidelity modeling of building collapse with realistic visualization of resulting damage and debris using the applied element method", *Applied Science International, LLC* (2009).
11. Tagel, D.H. and Rahman, N. "Simulation of the Alfred P. Murrah federal building collapse due to blast loads",

- Architectural Engineering National Conference*, Omaha, Nebraska (2006).
12. Sikiwat, T., Breidt, M. and Hartmann D. "Collapse simulations of large scale complex structures due to controlled explosives", *7th Euromech Solid Mechanics Conference*, Lisbon, Portugal (2009).
13. General Service Administration (GSA), "Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects", General Service Administration, Washington (2003).
14. DoD UFC Guidelines, "Design of buildings to resist progressive collapse, unified facilities criteria (UFC) 4-023-03", Department of Defence (DOD) (2005).
15. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Pre-standard and commentary for the rehabilitation of buildings", FEMA-356 (2000).
16. Kaewkulchai, G. and Williamson, E. "Dynamic behavior of planar frames during progressive collapse", *In 16th ASCE Engineering Mechanics Conference* (2003).
17. Kokot, S., Anthoine, A., Negro, P. and et al. "Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse", *Engineering Structures*, **40**, pp. 205-217 (2012).
18. Helmy, H., Salem, H. and Mourad, Sh. "Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method", *Elsevier, Engineering Structures*, **42**, pp. 127-141 (2012).
19. Salema, H.M., El-Fouly, A.K. and Tagel-Din, H.S. "Toward an economic design of reinforced concrete structures against progressive collapse", *Engineering Structures*, **33**(12), pp. 3341-3350 (2011).
20. Office of the National Building Regulations, *6th Issue of National Building Codes Loads on Buildings*, Tehran, Publication of Iran, 3ed Edition (2013).
21. Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings standard no. 2800", Tehran, Road Housing and Urban Development Research Center, 4th Edition (2014).
22. Office of the National Building Regulations, "9th issue of national building codes design and implementation of reinforced concrete buildings", Tehran, Publication of Iran, 4th Edition (2013).