مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل»
سال چهارم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۲؛ ص ۱۶۶- ۱۵۷

تأثیر عملکرد زنجیره‌ای بر کاهش میزان آسیب‌پذیری سازه‌های قاب خمشی فولادی در برابر انهدام پیش‌رونده

مصطفی رحمانی ایرج[۱]، مهدی اژدری مقدم[۲*]، محمد مؤیدیان[۳]

۱- کارشناس ارشد باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان ۲- دانشیار دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

(دریافت: ۹۲/۰۱/۲۰، پذیرش: ۹۲/۰۸/۰۷)

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در مباحث سازه‌ای پدافند غیرعامل مطرح می‌شود، بحث خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها است. بر اثر انهدام ناگهانی عضو سازه‌ای توسط حوادث متعدد عمدی (حملات نظامی و تروریستی) و یا غیرمترقبه (زلزله) با انتشار خرابی به اعضای مجاور و عدم توانایی ساختمان جهت رسیدن به شرایط تعادل ایستایی جایگزین، خرابی پیش‌رونده رخ خواهد داد که منجر به تخریب جزئی و حتی کلی ساختمان می‌شود. از طرفی، حذف اعضای بحرانی سازه در موقعیت‌های مختلف ساختمان، پتانسیل‌های متفاوتی در ایجاد خرابی پیش‌رونده دارند. از مکانیسم‌های بازتوانی ساختمان در برابر رخ داد حاصل، عملکرد زنجیره‌ای سیستم سازه‌ای جهت رسیدن به تعادل جایگزین و پایداری سازه است. در این تحقیق با استفاده از تحلیل ایستایی غیرخطی پوش عمودی (Push-Down Analysis) و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی بر روی ساختمان‌های فولادی قاب خمشی طراحی شده بر اساس مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان، به بررسی عملکرد سازه پس از حذف ستون در موقعیت‌های متفاوت و تأثیر آن در پتانسیل ایجاد خرابی‌های پیش‌رونده پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساختمان‌ها در نتیجه حذف ستون گوشه، بیشترین پتانسیل ایجاد خرابی پیش‌رونده و در عین حال کمترین عملکرد زنجیره‌ای را دارا می‌باشند و پایداری سازه در رسیدن به تعادل جایگزین پس از حذف ستون، با تقویت چنین عملکردی بهبود خواهد یافت.

کلیدواژه‌ها: پدافند غیرعامل، خرابی پیش‌رونده، عملکرد زنجیره‌ای، تحلیل ایستای غیرخطی پوش عمودی، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی.

Effect of Catenary Action on Reducing the Vulnerability of Steel Bending - Frame Structures versus Progressive Collapse

M. Rahmani Iraj, M. Azhdary Moghaddam*, M. Moayyedian

Azhdary Moghaddam, M., Associate Professor University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

(Received: 09/04/2013; Accepted: 29/10/2013)

Abstract

One of the most important issues in passive defense considerations is progressive collapse. For instant destruction of structural member due to different incidents such as deliberate or unexpected events, propagation of destruction to adjacent members and inability of building to achieve static alternative equilibrium conditions, progressive collapse occurs, which leads to partial or even total destruction. On the other hand, removing critical members in different buildings situations may have various progressive collapse potentials. Catenary action is a building rehabilitation mechanisms to achieve equilibrium alternative and stability of the structure. In this study, based on the sixth and tenth national building regulations and using vertical push nonlinear static analysis (Push-Down Analysis) and nonlinear dynamic time history analysis of steel bending frame structures, performance of the structure by removing columns in different locations and its effect on potential progressive collapse, are discussed. The results show that it has highest effect when a corner column is removed while it has lowest catenary action in building. Structural stability to achieve alternative equilibrium after columns removal, will improve by strengthening catenary action building performance.

Keywords: Passive Defence, Progressive Collapse, Catenary Action, Nonlinear Static Push-Down Analysis, Nonlinear Dynamic Time History Analysis.

* Corresponding Author E-mail: mazhdary@eng.usb.ac.ir

۱. مقدمه

انهدام (خرابی) پیش‌رونده اصولاً یک خرابی کوچک محلی سازه‌ای است که منجر به فروریزش بخشی یا حتی تمام سازه می‌شود. به‌عبارتی دیگر، انهدام پیش‌رونده زمانی پیش می‌آید که سازه از رسیدن به تعادل ایستای جایگزین پس از حذف عضو ناتوان باشد. روش‌های طراحی سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده به‌وضوح در اسناد دولتی امریکا همچون مدیریت خدمات عمومی امریکا (2003)GSA و ضوابط یکپارچه مربوط به تأسیسات و تجهیزات ایالات متحده UFC (2005) ارائه شده است، استاندارد (05-7) ASCE دو روش طراحی برای مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده ارائه می‌دهد که شامل روش طراحی مستقیم و روش طراحی غیرمستقیم می‌باشد. در روش طراحی مستقیم، مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده را به‌طور مستقیم در طول فرایند طراحی از دو طریق در نظر می‌گیرند:

الف: روش مسیر جایگزین[1] (APM) که به‌دنبال ارائه مسیر فرعی برای بار پس از وقوع خرابی است، به‌نحوی که جلوی آسیب موضعی گرفته شده و از گسیختگی کلی جلوگیری شود.

ب: روش مقاومت موضعی ویژه، که به‌دنبال ارائه توان کافی برای مقاومت دربرابر خرابی در محل‌های بحرانی است.

روش طراحی غیرمستقیم به‌طور ضمنی مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده را از طریق ضوابط مربوط به حداقل سطوح مقاومت، پیوستگی و انعطاف پذیری بررسی می کند.

دستورالعمل GSA(2003) پیشگیری از خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها را بر اساس مسیر جایگزین پیشنهاد نموده است. این دستورالعمل سناریوهایی را تعریف می‌کند که طبق آن، یکی از ستون‌های ساختمان برداشته شده و سازه آسیب دیده برای بررسی واکنش های سیستم تحلیل می‌شود [۱].

دستورالعمل UFC (2005) نیز دو شیوه طراحی سازه‌ها در برابر این پدیده با نام‌های روش نیروی مهاری[2] (TFM) و روش مسیر جایگزین (APM) مطرح نموده است [۲].

روش TFM لزوماً یک روش طراحی غیرمستقیم است که در آن حداقل ظرفیت اتصالات در سیستم باید درحدی باشد تا بتواند بارها را از قسمت آسیب دیده به باقی سازه انتقال دهد. این روش به‌طور مفهومی تکیه بر عملکرد زنجیره‌ای برای جلوگیری از فروریزش دارد که خود یکی از مکانیسم‌های کلیدی کمک به سازه آسیب دیده برای رسیدن به یک پیکربندی تعادل جایگزین است. در عملکرد زنجیره‌ای، اعضایی چون تیر و سقف‌های بتنی مسلح باربر تحت تأثیر تغییر شکل‌های بزرگ قرار گرفته که می‌بایست به‌قدر کافی سختی و مقاومت لازم در برابر بارهای وارده تحت کشش اعضا را داشته باشند [۳].

آئین‌نامه ASCE 7-02 (2005) رهنمودهایی برای طراحی عمومی سازه‌ها جهت بهبود رفتار سازه‌ای که شامل عملکرد زنجیره‌ای در سقف‌های بتنی می‌باشد، پیشنهاد نموده است [۲]. دستورالعمل NIST,(2007) نیز استفاده از عملکرد زنجیره‌ای را برای ارتقاء رفتار سازه‌های موجود پیشنهاد کرده است [۲]. باتوجه به اینکه تاکنون دستورالعملی جهت طراحی سازه‌ها با تأمین عملکرد زنجیره‌ای در رفتار سازه ارائه نشده است، بنابراین نیاز به بررسی این عملکرد در بهبود رفتار سازه‌ها در برابر خرابی پیش رونده، همچنان در زمره اصلی‌ترین تحقیقات محققین قرار دارد [۳].

هامبرگر و همکارش در تحقیقات خود مزایای در نظر گرفتن این عملکرد در طراحی سازه‌ها را این گونه بیان می‌نمایند [۴]:

۱- با در نظر گرفتن این عملکرد، ضرورتی برای استفاده از قاب خمشی در تمام سطوح سازه (یکی از روش‌های رایج جلوگیری از انهدام پیش‌رونده استفاده از سیستم قاب خمشی در اکثر سطوح ارتفاعی سازه می‌باشد) جهت جلوگیری از خرابی پیش‌رونده وجود ندارد.

۲- با در نظر گرفتن این عملکرد، اعمال ظرفیت انعطاف‌پذیری قابل توجه در اعضای افقی قاب‌های سازه‌ای (تیرها) و اتصالات آنها ضرورتی ندارد.

۳- با در نظر گرفتن این عملکرد، فراهم نمودن مقاومت تمام گیردار برای قاب‌هایی که بر اساس آئین‌نامه‌های رایج اتصالات آنها ظرفیت کششی لازم در زمان گسترش عملکرد زنجیره‌ای در سازه در برابر خرابی پیش رونده را داراست ضرورتی ندارد.

یکی از موضوعات اصلی تحقیقات اخیر دنیا، تحقیقات بر روی عملکرد زنجیره‌ای است. یین و همکارش روش تحلیل عمومی عملکرد زنجیره‌ای در تیرهای فولادی تحت تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از آتش‌سوزی را ارائه دادند. آستانه اصل با انجام بیش از ۱۰ آزمایش عملی در مقیاس واقعی، سازه‌های یک طبقه با تعبیه کابل‌های فولادی در داخل و نقاط مختلف سقف و با بهره‌گیری از تحلیل‌هایی شامل عملکرد زنجیره‌ای، به تأثیرات اقتصادی طرح و کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سقف‌هایی که یکی از ستون‌های خارجی آن حذف می‌شوند اشاره نمود. بایفیلد و همکارش در تحقیقات خود نشان دادند که استاندارد صنعتی تیر-ستون‌ها، شکل‌پذیری لازم تحت جابه‌جایی‌های بزرگ سقف در زمان رخداد انهدام پیش‌رونده را ندارند [۵]. کیم و همکارش در تحقیقات خود بر روی سازه‌های فولادی قاب خمشی، با بررسی عملکرد زنجیره‌ای نشان دادند با افزایش تعداد دهانه و استفاده از مهاربند در دهانه انتهایی سیستم لرزه‌ای سازه، میزان عملکرد زنجیره‌ای بهبود پیدا می‌کند [۳].

در تحقیق حاضر با بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده و عوامل تأثیرگذار به تغییرات عملکرد زنجیره‌ای در مراحل حذف ستون در موقعیت‌های متفاوت سازه‌های مورد تحقیق و تأثیر موقعیت

[1] Alternate Path Method
[2] Tie Force Method

ستون‌های حذفی در تعیین رفتار سازه با توجه به عملکرد زنجیره‌ای پرداخته شده است.

۲. هدف از تحقیق

در ساختمان، ستون‌های سازه از اعضای بحرانی به‌شمار می‌روند که حذف هر کدام از آنها، پتانسیل متفاوتی در امر خرابی پیش‌رونده سازه دارند. از عواملی که سازه را در خطر فروریزش و انهدام قرار می‌دهد، از بین رفتن ستون‌ها در موقعیت‌های بحرانی توسط حوادث متعدد طبیعی (زلزله) و غیرطبیعی (حملات نظامی و تروریستی) است. پس از فقدان ستون، پتانسیل پیش روی خرابی در سازه بالا رفته و در چنین وضعیتی بازتوانی سازه جهت رسیدن به شرایط تعادل ایستای جایگزین، امری ضروری خواهد بود. عملکرد زنجیره‌ای به‌وجود آمده در اعضای باقی مانده سازه، باعث انتشار بار بازپخش شده ناشی از حذف ستون شده و در نتیجه بازتوانی لازم جهت نایل شدن به تعادل ایستای جایگزین را فراهم می‌نماید. استفاده از عملکرد زنجیره‌ای سازه توسط اتصالات تیر- ستون و استفاده از قابلیت تحمل نیروی محوری تیرها در روند طراحی سازه، گامی مؤثر در کاهش خرابی و افزایش پایداری سازه در روند حذف اعضای بحرانی آن می‌باشد.

هدف تحقیق حاضر، ارزیابی ساختمان‌ها در برابر حذف ستون‌های بحرانی و تأمین پایداری آنها می‌باشد، تا بر اساس آن بتوان به بهبود عملکرد سازه‌های فولادی و افزایش مقاومت و پایداری آنها در برابر خرابی پیش‌رونده دست یافت.

جهت نایل شدن به اهداف تحقیق، تحلیل‌هایی برای بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده به‌صورت خطی و غیرخطی نیاز می‌باشد. در اینجا از تحلیل ایستای غیرخطی پوش عمودی[1] برای بیان سطح عملکرد سازه طرح الگوی فروریزش و از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی برای بیان نتایج دقیق و واقعی‌تر استفاده می‌شود. در این تحقیق، بررسی عملکرد زنجیره‌ای و تأثیر موقعیت ستون‌ها بر آن در پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های فولادی مد نظر است. پس از حذف دینامیکی ستون تحت شرایط خاص و در موقعیت‌های متفاوت، پلان ساختمان در دو شرایط با و بدون در نظر گرفتن عملکرد زنجیره‌ای به بررسی سطح عملکرد سازه ناشی از حذف ستون پرداخته خواهد شد.

۳. روش تحقیق

در روند تحلیل و طراحی سازه‌های مورد تحقیق از مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان و همچنین نشریه ۳۶۰ (به‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود) [۶] در طراحی و بیان سطوح عملکرد سازه، آئین‌نامه FEMA-356 در تعاریف پارامترهای مفاصل خمیری [۷] و استانداردهای رایج UFC(2005) و GSA(2003) در انتخاب نحوه بارگذاری ویژه سازها در محیط نرم‌افزاری استفاده شده است. سازه‌ها در محیط نرم‌افزار ETABS (v9.7) طراحی و سپس بنا به نیاز تحلیل‌های مورد نظر و شرایط بارگذاری خاص در روند تحلیل خرابی‌های پیش رونده به محیط نرم‌افزار SAP2000(v14) انتقال داده شده‌اند [۸].

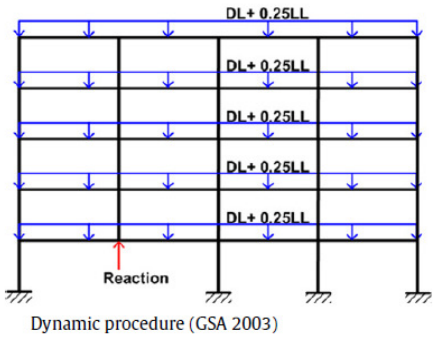
سازه‌های مورد تحقیق از نوع سیستم قاب خمشی فولادی معمولی و متوسط در هر دو جهت با پلان مشترک و تعداد طبقات متفاوت ۳، ۵ و ۹ طبقه از نوع فولاد نرمه St37 با تنش تسلیم Fy=2400 است. از مقاطع پیش‌فرض استاندارد نرم‌افزار که در جدول‌های (۳- ۱) ارائه شده برای اختصاص بهتر مفاصل خمیری و درک رفتاری دقیق‌تر اعضای تیر و ستون استفاده شده است. جهت انتقال نیروهای باز پخشی ناشی از حذف عضو، اتصالات تیر به ستون به صورت گیردار و با جوش صفحات فوقانی و تحتانی به همراه پیچ و پرچ در جان درنظر گرفته شده است. سقف‌ها از نوع تیرچه بلوک بوده و با اختصاص دیافراگم صلب به تمام طبقات سازه تعریف شده است. میرایی نیز برای کل سازه معادل ۵٪ فرض شده است. در فرآیند تحلیل سازه‌ها از حذف دینامیکی ستون‌ها و عملکرد دینامیکی سازه پس از حذف عضو استفاده شده و از ضربات اولیه و مستقیم موج انفجار بر سازه صرف نظر گردیده است.

مطابق با توصیه آئین‌نامه ذکر شده، در انجام آنالیزهای خرابی پیش‌رونده، بار مشخصه وارد به سازه می‌بایست طبق رابطه زیر تعیین شود:

$$U = \alpha\ (DL + 0.25\ LL + WALL) \quad (۱)$$

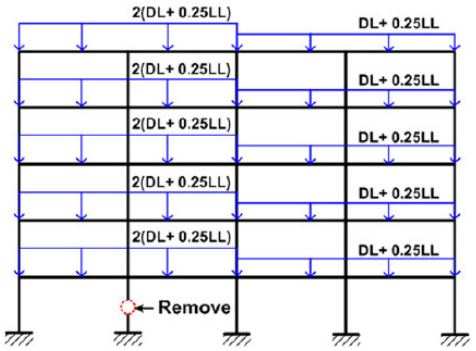
که در آن، DL بار گسترده سطحی سقف به همراه دیوارهای داخلی، LL بار گسترده سطحی زنده و WALL بار گسترده خطی دیوارهای محیطی است.

ضریب بزرگ‌نمایی α نیز جهت لحاظ نمودن دخالت اثرات دینامیکی، فقط در آنالیزهای استاتیکی، به ترکیب بار اعمال و مقدار آن برابر ۲ لحاظ می‌شود. نحوه اعمال ترکیب بار موردنظر در آنالیزهای ایستای و دینامیکی مطابق پیشنهاد آیین نامه GSA(2003) در شکل‌های (۱ و ۲) نشان داده شده است [۳].



شکل ۱. بارگذاری ویژه در تحلیل‌های دینامیکی [۳]

[1] Push-Down Nonlinear Static Analysis



شکل ۲. بارگذاری ویژه در تحلیل‌های ایستای [۳]

۴. تحلیل ایستای غیرخطی پوش عمودی

روش تحلیل پوش‌آور عموماً در زمینه‌های مهندسی زلزله کاربرد دارد. با اقتباس از این روش به بررسی عملکرد سازه‌ای ساختمان‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده پرداخته می‌شود. از مزایای آن می‌توان توانایی در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مصالح بدون دخالت رفتار هیسترزیس مصالح و کاهش زمان تحلیل بر خلاف تحلیل‌های تاریخچه زمانی اشاره کرد. از معایب این روش می‌توان عدم توانایی در نظر گرفتن اثر دینامیکی فرآیند حذف ستون از سازه را نام برد. همچنین این شیوه در تصمیم‌گیری‌های محدوده الاستیک و حدود خرابی سازه بسیار مفید است. در پژوهش حاضر تحلیل پوش عمودی انجام می گیرد، به‌عبارت دیگر با افزایش نموی تغییر مکان قائم در محل ستون حذف شده در هر مرحله از آنالیز، مقاومت سازه و سطوح عملکرد آن در برابر این تغییر شکل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طرفی تحلیل پوش عمودی غیرخطی، روش کنترل جابه‌جایی به‌شمار رفته و تحلیل‌ها با تغییرات جابه‌جایی برای رسیدن به سطوح عملکرد دلخواه سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما از سوی دیگر، روش کنترل بار پیشنهادی در آئین‌نامه GSA(2003) نیز با افزایش بار برای رسیدن به سطح عملکرد دلخواه خاصی به‌کار گرفته می‌شود. بنابراین در روش به‌کار رفته در این پژوهش، پارامترهای کنترلی برای رسیدن به سطوح عملکرد سازه با استاندارد مربوطه متفاوت است.

بنا بر تحقیقات صورت گرفته توسط ماجانیشویلی و همکارش تحلیل پوش عمودی به روش کنترل بار شامل چندین تحلیل و باز تحلیل وابسته به گام‌های اعمالی بار می‌باشد [۹]. از طرفی تحلیل پوش عمودی به روش کنترل جابه‌جایی در تحلیل سازه بسیار ساده بوده و بر خلاف برخی تحلیل‌ها از نظر یکتایی جواب و همگرایی به مراتب وضعیت بهتری خواهد داشت. در این نوع تحلیل، بارهای ثقلی در تمام تیرها اعمال گشته و در تمام مراحل تحلیل ثابت در نظر گرفته می‌شوند. پس از حذف ستون، در هرگام از تحلیل سازه، میزان بارهای متناظر با تغییر مکان قائم اعمال شده در محل ستون حذف شده برداشت و ثبت می شود. در نهایت، نسبت بار تعادل به بار ثقلی اولیه سازه را تحت عنوان ضریب بار بیان می‌نمایند. به‌عبارت ساده‌تر می‌توان این ضریب را نسبت بار در هر لحظه از پوش عمودی به کل بار اولیه سازه بیان نمود. از میان ستون‌های قرار گرفته در موقعیت‌های متفاوت، بیشترین پتانسیل خرابی پیش‌رونده با حذف ستونی که دارای کمترین ضریب بار است، ایجاد می‌شود [۴]. در آئین‌نامه GSA(2003) و UFC(2005-2009) ترکیب بارهای متناظر با تحلیل‌های ایستای غیرخطی با اختصاص ضریب بزرگ‌نمایی به دهانه‌هایی که مجاور ستون حذفی می‌باشند و عدم استفاده از این ضریب بزرگ‌نمایی در دیگر دهانه‌ها در نظر گرفته می‌شود که به شرح زیر می‌باشد:

$$\text{ضریب بار} = \frac{\text{بار تعادل متناظر با تغییر مکان هدف}}{\text{بار ثقلی کل}}$$

۵. تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی

واضح است که در بیشتر تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، سازه‌ها مستلزم مدل‌سازی غیرخطی اعضا و اتصالات می‌باشند. با این وجود، پیشرفت‌های اخیر در زمینه نرم‌افزاری، به‌کارگیری روش‌های ارزیابی سازه‌ای پیچیده را بدون مشکل زیاد برای مهندسان ممکن ساخته است. علاوه بر این، مدل‌سازی ریاضی اعضای سازه‌ای برای تحلیل خرابی پیش رونده نیازمند در نظر گرفتن رفتار هیسترتیک پیچیده شامل سیکل‌های باربرداری مثل سازه‌های در معرض بار لرزه‌ای نیست. در این مورد می‌توان از تحلیل غیرخطی دینامیکی به‌عنوان ابزار دقیق‌تر و مفیدتری برای ارزیابی امکان خرابی پیش رونده استفاده نمود [۲].

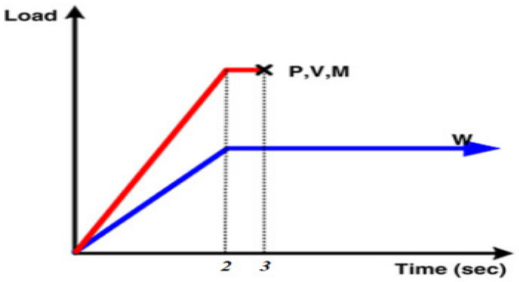
۶. حذف دینامیکی ستون

حذف ناگهانی ستون از سازه، خود فرآیندی دینامیکی بوده که نیازمند تعریف آن در محیط نرم‌افزاری می‌باشد بنابراین، در تحقیقات به‌عمل آمده از توابعی جهت فرآیند حذف ستون از سازه که در شکل (۳) ارائه شده، استفاده می‌شود.

برای انجام تحلیل دینامیکی، نیروهای داخلی محوری، برشی و لنگر خمشی ستون قبل از برداشتن محاسبه شده است. سپس المان ستون با بارهای متمرکزی معادل نیروهای داخلی آن در محل اتصال جایگزین شده است. برای شبیه‌سازی پدیده حذف ناگهانی ستون، این بارهای متمرکز همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، پس از گذشت زمان معینی برداشته می‌شوند. در این شکل، متغیرهای P و V, M نشانه نیروی محوری، نیروی برشی، و ممان خمشی هستند و W بارهای وارد بر سازه می‌باشد.

در این بررسی نیروها به طور خطی در مدت ۲ ثانیه افزایش داده شده تا از صفر به مقادیر کامل خود برسند، سپس به مدت ۱ ثانیه بدون تغییر نگه داشته شده تا اینکه سیستم به وضعیت تعادل ثابت اولیه برسد. سپس نیروهای شبیه‌ساز وجود ستون در نقطه موردنظر به صورت ناگهانی در ۰/۰۰۱ ثانیه حذف شده تا تأثیر دینامیکی ایجاد شده با برداشتن ناگهانی ستون شبیه سازی شود. برای در نظر

گرفتن عملکرد زنجیره‌ای، به تیرهای سازه‌ای این قابلیت داده می‌شود تا در انتقال نیروی محوری سهیم باشند. مراحل لازم جهت انجام حذف مرحله‌ای ستون‌های سازه بدین گونه خواهد بود که حذف ستون اول در گام نخست خود شرایط پیش‌زمینه برای انجام تحلیل سازه در گام حذفی ستون دوم خواهد بود؛ با توجه به این نکته که شرایط به‌وجود آمده از حذف ستون اول در روند تحلیلی حذف ستون ثانویه تأثیرگذار بوده و به صورت اتوماتیک و پیوسته توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد.



شکل ۳. نحوه حذف دینامیکی ستون در نرم‌افزار [۱۰]

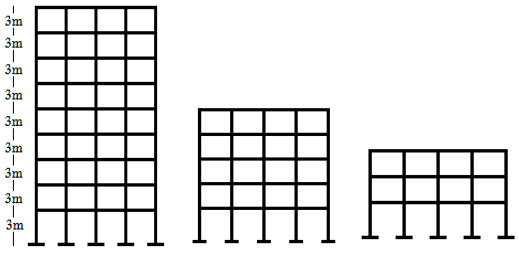
۷. مدل‌سازی

ساختمان‌های مورد بررسی دارای ۳، ۵ و ۹ طبقه بوده و در شهر مشهد بر روی خاک نوع II با خطر نسبی زلزله زیاد قرار داشته و دارای اسکلت فولادی با سیستم مقاوم قاب خمشی معمولی برای ۳ طبقه و متوسط برای ۵ و ۹ طبقه در هر دو جهت می باشند [۱۱]. همچنین ارتفاع طبقات سازه ۳ متر است که در شکل (۴) نشان داده شده است. تکیه‌گاه‌ها گیردار و ابعاد دهانه‌ها ۵ متر و سقف نیز از نوع تیرچه- بلوک با الگوی بارگذاری شطرنجی لحاظ می‌شود. شایان توجه است که در انتخاب مشخصات مذکور، تلاش شده است تا ویژگی‌های رایج ساختمان‌های فولادی ایران، در حد امکان تأمین گردند. مقاطع تیر و ستون ساختمان های مورد تحقیق در جدول‌های (۳-۱) ارائه گردیده و نیز پلان مشترک سازه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است [۱۲ و ۱۳].

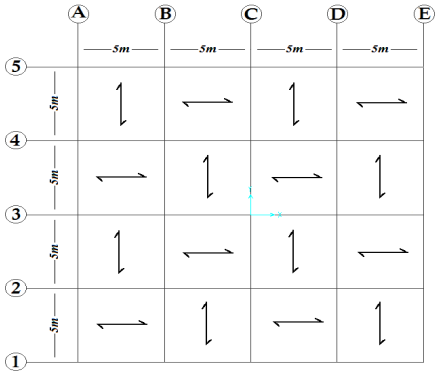
بار مرده طبقات: $۶۵۰ \frac{kg}{m^2}$ بار مرده بام: $۵۵۰ \frac{kg}{m^2}$

بار زنده طبقات: $۲۰۰ \frac{kg}{m^2}$ بار زنده بام: $۱۵۰ \frac{kg}{m^2}$

بار دیوارهای محیطی طبقات: $۲۵۰ \frac{kg}{m}$



شکل ۴. نمای ارتفاعی سازه‌ها



شکل ۵. پلان ساختمان (مشترک بین کلیه سازه‌ها)

جدول ۱. مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۳ طبقه

طبقه	ستون	تیرهای پیرامونی	تیرهای داخلی
۱	W۱۲×۶۵	W۱۴×۳۰	W۱۴×۲۶
۲	W۱۲×۶۵	W۱۴×۲۶	W۱۴×۲۲
۳	W۱۲×۶۵	W۱۰×۲۶	W۱۰×۲۲

جدول ۲. مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۵ طبقه

طبقه	ستون	تیرهای پیرامونی	تیرهای داخلی
۱	W۱۲×۱۰۶	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۲	W۱۲×۱۰۶	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۳	W۱۲×۱۰۶	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۴	W۱۲×۶۵	W۱۴×۲۶	W۱۴×۲۲
۵	W۱۲×۶۵	W۱۰×۲۶	W۱۰×۲۲

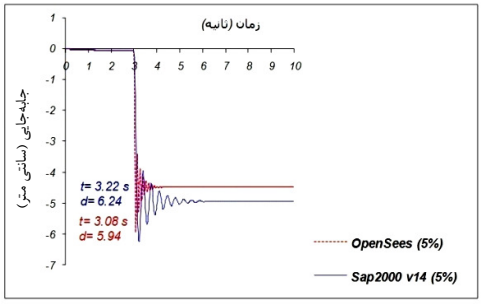
جدول۳. مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۹ طبقه

طبقه	ستون	تیرهای پیرامونی	تیرهای داخلی
۱	W۱۴×۲۱۱	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۲	W۱۴×۲۱۱	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۳	W۱۴×۲۱۱	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۴	W۱۴×۱۷۶	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۵	W۱۴×۱۷۶	W۱۴×۳۴	W۱۴×۳۰
۶	W۱۴×۱۷۶	W۱۴×۳۰	W۱۴×۲۶
۷	W۱۴×۱۴۵	W۱۴×۳۰	W۱۴×۲۶
۸	W۱۴×۱۴۵	W۱۴×۳۰	W۱۴×۲۲
۹	W۱۴×۱۴۵	W۱۰×۲۲	W۱۰×۱۹

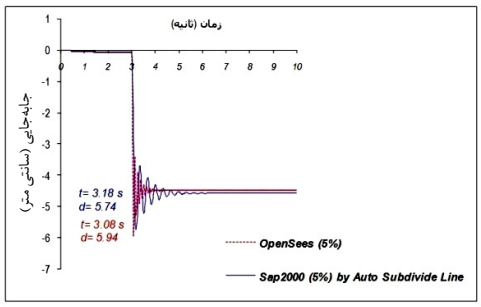
در این تحقیق روند حذف دینامیکی ستون از سازه‌ها مطابق شکل (۳) در محیط نرم‌افزاری با اختصاص مفاصل خمیری به اعضای سازه‌ای صورت گرفته است. اختصاص تعداد مفاصل خمیری بیشتر در طول عضو زمان تحلیل را بالا برده در عین حال دقت نتایج را نیز بالاتر خواهد برد. پس از پیاده‌سازی شرایط یکسان تحلیل، بارگذاری و تعرف مقاطع اعضا برای سازه ۳ طبقه در دو محیط نرم‌افزاری SAP2000(v14) و Opensees جهت حذف ستون مرکزی ۳۷ با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی با گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه

به همراه میرایی ٪۵، نتایج به‌دست آمده در شکل (۶) نمایش داده شده است.

دقت عملکرد نرم‌افزار SAP2000(v14) در مقایسه با نرم‌افزار Opensees با درصد اختلاف بسیار کم قابل مشاهده بوده و در عین حال با افزایش تعداد مفاصل خمیری به اعضای سازه‌ای، این اختلاف نیز به طرز چشم‌گیری کاهش پیدا نموده که شکل (۶- ب) بیانگر این امر می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای جابه‌جایی - زمان در حذف دینامیکی ستون مرکزی ۳۷ از سازه ۳ طبقه توسط نرم‌افزار SAP2000 و نرم‌افزار Opensees الف) اختصاص مفاصل به ابتدا و انتهای عضو سازه‌ای و ب) اختصاص مفاصل به هر ۵۰ سانتی‌متر از عضو سازه‌ای

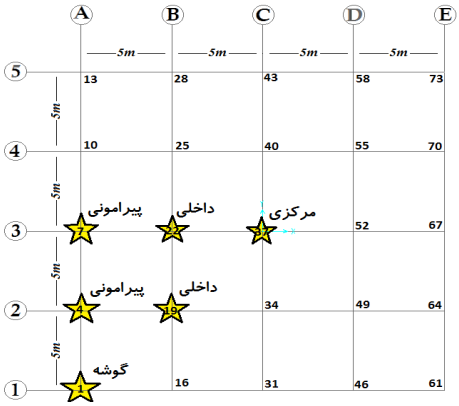
۸. سناریوی موقعیت حذف ستون

ستون‌های مورد بررسی در پلان ساختمان‌های مورد بحث به ۴ گروه مرکزی، داخلی، پیرامونی و گوشه تقسیم‌بندی شده است. برای هریک از گروه‌های پیرامونی و داخلی نیز دو حالت متفاوت متصور خواهد بود که در مجموع ۶ حالت برای قرارگیری متفاوت ستون در پلان وجود دارد که در شکل (۷) این ۶ حالت ارائه شده است.

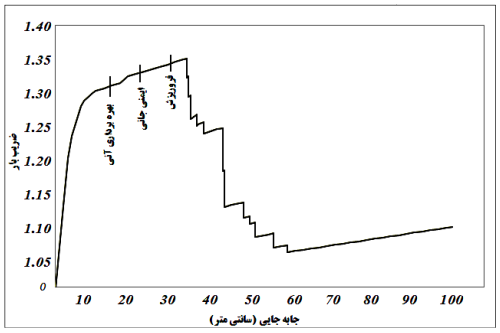
به دلیل تقارن در پلان ساختمان‌های مورد بحث، هریک از ستون‌های موجود در پلان طبقه به‌طور قطع در یکی از همین ۶ حالت قرار خواهد گرفت.

۹. نتایج و بحث

در شکل (۸) روند تحلیلی پوش و سطوح بهره‌برداری، ایمنی جانی و فروریزش سازه در حذف ستون مرکزی شماره ۳۷ در طبقه اول سازه ۳ طبقه نشان داده شده است [۶].



شکل ۷. موقعیت قرارگیری ستون‌های حذف شده (در این تحقیق) در پلان طبقه اول همه سازه‌ها (شماره مشخص شده برای ستون‌ها به‌طور اختصاصی مربوط به سازه ۳ طبقه است)

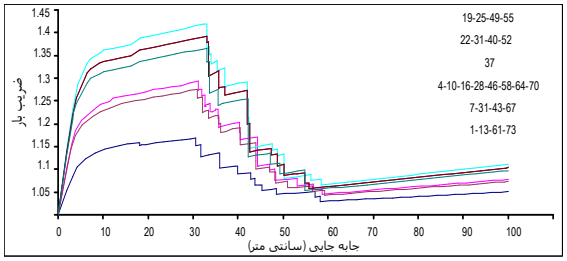


شکل ۸. نمودار جابه‌جایی - ضریب بار و تعریف سطوح عملکرد سازه

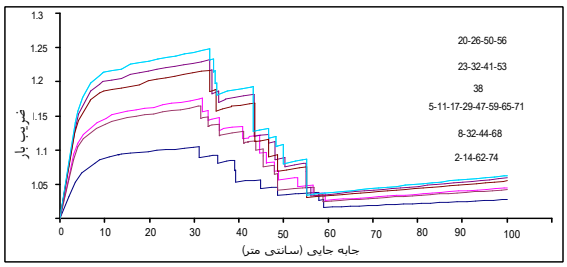
همچنین در شکل (۹) نمودارهای ضریب بار - جابه‌جایی حاصل از تحلیل ایستای غیرخطی پوش عمودی پس از حذف ستون‌ها در موقعیت‌های یاد شده در سازه ۳ طبقه نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینید با افزایش شماره طبقات در نمودارها، میزان ضریب بار کاهش می‌یابد که بحرانی بودن ستون‌های طبقه اول را نشان می‌دهد، بنابراین ستون‌های گوشه با کمترین میزان ضریب بار و سپس ستون‌های پیرامونی و همچنین ستون‌های داخلی و مرکزی بیشترین میزان ضریب بار را به خود اختصاص داده‌اند. ضریب بار کمتر بیانگر پتانسیل خرابی پیش رونده بالاتر است [۱۴].

به‌عبارتی دیگر، ساختمان عملکرد ضعیف‌تری در پیشگیری از ادامه خرابی پس از حذف ستون گوشه نسبت به دیگر ستون‌ها با موقعیت‌های متفاوت دارد. سازه با روند افزایش بار عمودی در ابتدا رفتار خطی داشته و سپس وارد محدوده غیرخطی می‌شود. به‌همین منوال مقدار جابه‌جایی در گره بالای ستون حذف شده، پیوسته با افزایش بار اعمالی از سطح بهره‌برداری آنی (IO) گذشته و وارد محدوده ایمنی جانی (LS) می‌شود که در این حالت، ساختمان با کاهش سختی و میرایی زیادی مواجه شده و با وارد شدن به حد فرو ریزش (CP) دیگر سازه قادر به باربری نبوده و مفاصل از حد تسلیم خارج می‌شوند.

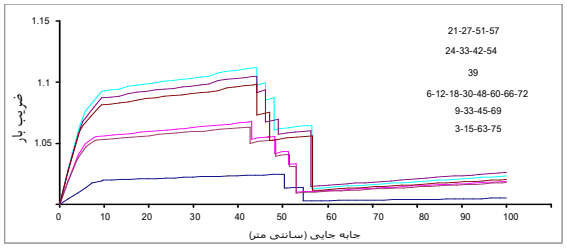
ضریب بار به‌دست آمده برای ستون گوشه در طبقه اول ۱/۱۵ و در ادامه در طبقه دوم ۱/۱۰ و در نهایت در طبقه سوم ۱/۰۲ خواهد بود که بیانگر ضعف سازه در پیشگیری از خرابی در طبقات بالاتر به‌دلیل کاهش تعداد تیرهای متصله به ستون است. در کلیه حالات اعمال بار در موقعیت‌های مختلف پلان، سازه جابه‌جایی در حدود ۳۰ سانتی‌متر در طی عبور از سطوح عملکرد تعریف شده را تجربه کرده و پس از آن، باربرداری از سازه توسط نرم‌افزار شروع شده و با بازپخش نیروها به اعضای مجاور پایداری ساختمان حفظ شده که در نهایت در جابه‌جایی ۶۰ سانتی‌متر گسیختگی در اعضا به‌وجود آمده و دیگر سازه قادر به تحمل بارهای اعمالی نبوده و تحلیل متوقف می‌شود.



(الف)



(ب)



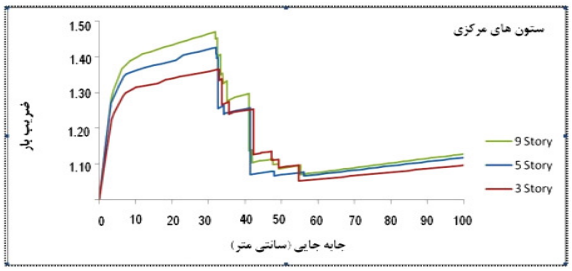
(ج)

شکل ۹. نمودار ضریب بار- جابه‌جایی برای سازه ۳ طبقه، الف) طبقه اول، ب) طبقه دوم و ج) طبقه سوم (اعداد روبروی نمودارها بیانگر شماره ستون‌های مربوط و موقعیت آنها در پلان و طبقات برگرفته از شکل (۷) می‌باشد)

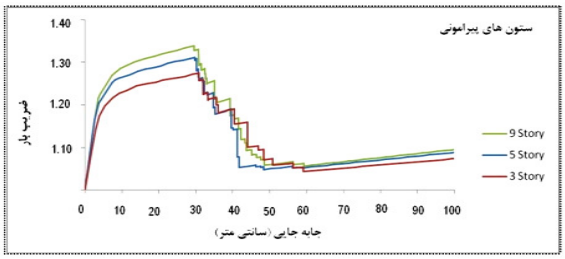
نمودارهای شکل (۱۰) به بررسی ضریب بار- جابه‌جایی در سناریوی حذف ستون با موقعیت یکسان در سازه‌های با تعداد طبقات متفاوت پرداخته که نتایج همان‌گونه که مشخص است بحرانی بودن ستون‌های سازه ۳ طبقه و سپس سازه ۵ طبقه و در نهایت سازه ۹ طبقه را وانمود می‌کند. با افزایش ارتفاع سازه سطح عملکرد ساختمان بهبود یافته و نسبت به دیگر سازه‌های با ارتفاع کمتر در برابر پدیده خرابی پیش‌رونده مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد.

در این بین، ستون‌های مرکزی و ستون‌های گوشه به‌ترتیب بیشترین و کمترین ضریب بار را به خود اختصاص داده‌اند که نشان از بالا بودن پتانسیل خرابی پیش‌رونده در ستون‌های گوشه در هر سه سازه می‌باشد.

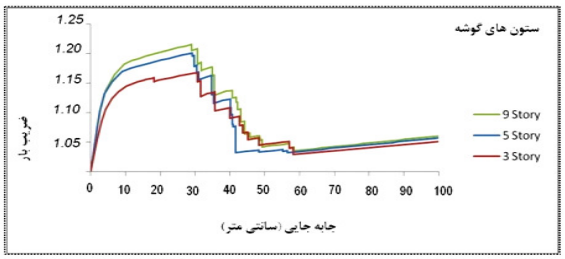
نمودارهای شکل (۱۱) جهت در نظر گرفتن عملکرد زنجیره‌ای در سازه‌های مورد تحقیق با انجام تحلیل ایستای غیرخطی پوش عمودی می‌باشد.



(الف)



(ب)



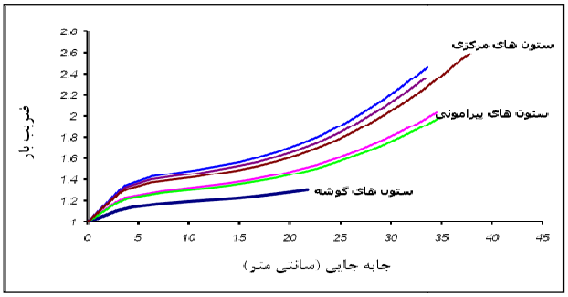
(ج)

شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای ضریب بار- جابه‌جایی در سازه‌های ۳، ۵ و ۹ طبقه در مراحل حذف ستون با موقعیت یکسان در پلان الف) ستون مرکزی، ب) ستون پیرامونی و ج) ستون گوشه

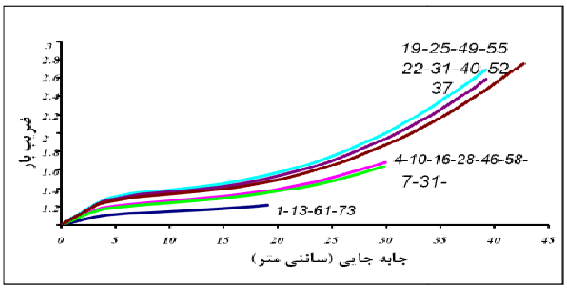
در سازه ۳ طبقه، با حذف ستون‌ها در موقعیت‌های بیان شده و افزایش بارهای اعمالی مرحله به مرحله برای رسیدن به جابه‌جایی مورد نظر ۳۰ سانتی‌متر و همچنین استفاده از بازپخش محلی نیروهای ناشی از حذف ستون در روند تحلیل نرم‌افزاری، جابه‌جایی عمودی در گره بالای ستون محذوف گوشه، معادل ۱۸/۵ سانتی‌متر و برای ستون‌های پیرامونی ۳۰ سانتی‌متر و برای ستون مرکزی شماره ۳۷ معادل ۴۲/۵ سانتی‌متر خواهد بود. در سازه‌های ۵ و ۹ طبقه، افزایش میزان جابه‌جایی گره بالای ستون‌ها در موقعیت یکسان، نشان از افزایش عملکرد زنجیره‌ای در سازه‌های با ارتفاع بیشتر خواهد بود. ستون‌های گوشه به‌علت کاهش تعداد تیرهای

متصل، دارای کمترین جابه‌جایی در تحلیل ایستای غیرخطی پوش عمودی بوده و با افزایش تعداد تیرهای متصل به ستون واقع در پیرامون سازه، این مقدار افزایش یافته و در ستون‌های داخلی و مرکزی به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

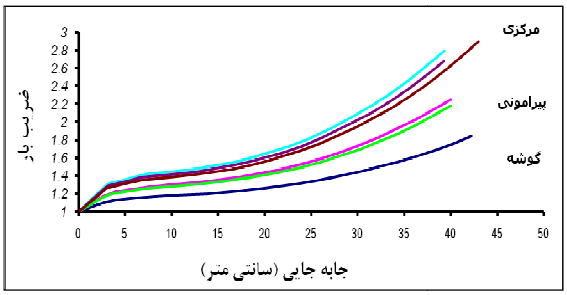
در تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی با استفاده از روش حذف دینامیکی ستون از سازه مطابق شکل (۳) در شرایطی که عملکرد زنجیره‌ای در نظر گرفته شود. پس از حذف ۳ ستون از سازه ۳ طبقه، ساختمان همچنان پایدار بوده و خرابی به صورت موضعی رخ داده که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. در این تحلیل به مصالح اجازه داده می‌شود تا وارد محدوده غیرخطی شده و از این رو تغییر شکل‌های بزرگ‌تر و اتلاف انرژی در اثر جاری شدن مصالح، ترک‌خوردگی و شکست رخ خواهد داد، انتخاب گزینه P-Delta Plus Large Displacement از داخل نرم افزار SAP2000 به تیرهای متصل به عضو حذفی این قابلیت را می‌دهد تا در تحمل بار محوری انتقالی شرکت داشته باشند و بدین ترتیب عملکرد زنجیره‌ای در تیرها فعال خواهد شد. در حالی‌که که عدم فعال‌سازی گزینه موردنظر در نرم‌افزار و در نتیجه در نظر نگرفتن عملکرد زنجیرای قاب باعث خواهد شد که در روند انجام تحلیل پس از حذف ستون ۱۹ از این سازه بازپخش نیروهای اعمالی به اعضای مجاور برای رسیدن به تعادل ایستای جایگزین انجام نشده و واگرایی در روند تحلیل بیانگر سرایت خرابی به اعضای مجاور عضو حذفی خواهد بود که در شکل (۱۳) نشان داده شده است. میرایی ٪۵ برای مرحله اول حذف ستون‌ها در نظر گرفته شده است و با افزایش دوره تناوب سازه پس از حذف ستون‌ها میرایی کاسته می‌شود که این اصلاح میرایی با انجام تحلیل مودال در هر مرحله از حذف ستون در نظر گرفته می‌شود. جابجایی گره های بالای ستون‌های حذف شده روند افزایشی داشته و بیشینه جابجایی با در نظر گرفتن عملکرد زنجیره‌ای در گره بالای ستون ۲۲ بوده که برابر ۲۲/۵ سانتی متر می‌باشد. افزایش ارتفاع سازه عملکرد زنجیره‌ای را افزایش داده و سازه‌های با ارتفاع بیشتر در حذف مرحله‌ای ستون‌ها سطح عملکرد بهتری نسبت به سازه‌های کوتاه‌تر نشان دادند.



(الف)

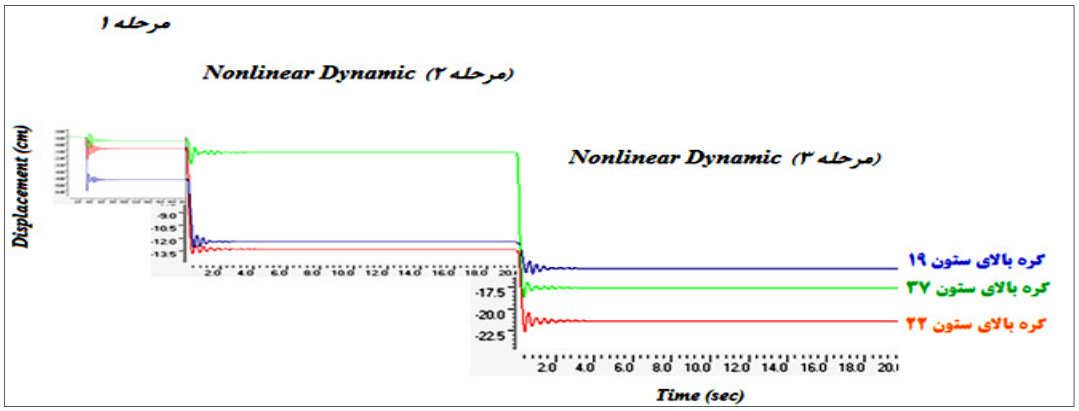


(ب)

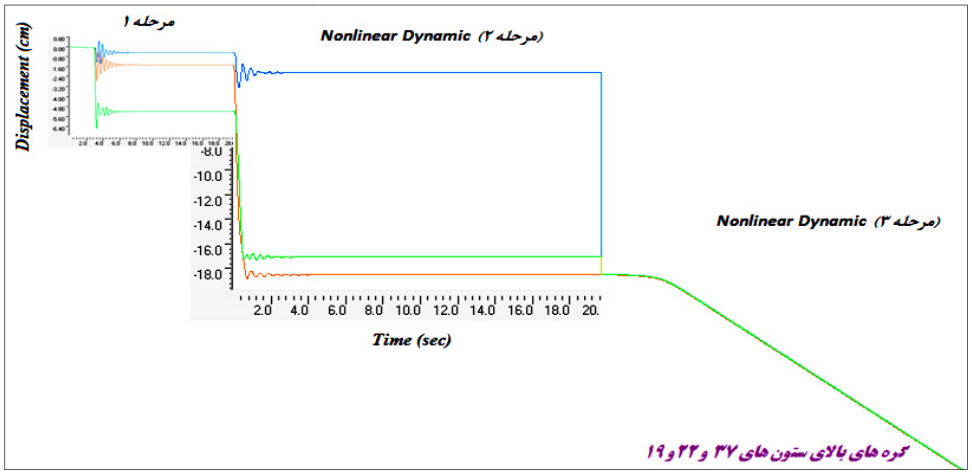


(ج)

شکل ۱۱. نمودار ضریب بار- جابه‌جایی جهت عملکرد زنجیره‌ای در سازه‌های ۳، ۵ و ۹ طبقه در مراحل حذف ستون با موقعیت یکسان در پلان الف) سازه ۳ طبقه برگرفته از موقعیت ستون ها در شکل (۷)، ب) سازه ۵ طبقه و ج) سازه ۹ طبقه



شکل ۱۲. نمودار تجمعی جابه‌جایی- زمان در طبقه اول سازه ۳ طبقه پس از حذف ستون‌های ۳۷ در مرحله اول، ستون ۲۲ در مرحله دوم و ستون ۱۹ در مرحله سوم با اصلاح میرایی و با درنظر گرفتن عملکرد زنجیره‌ای



شکل ۱۳. نمودار تجمعی جابه‌جایی- زمان در طبقه اول سازه ۳ طبقه پس از حذف ستون‌های ۳۷ در مرحله ۱ (رنگ سبز)، ستون ۲۲ (رنگ قرمز) در مرحله ۲ و ستون ۱۹ در مرحله ۳ (رنگ آبی) با اصلاح میرایی و بدون درنظر گرفتن عملکرد زنجیره‌ای

۱۰. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عملکرد زنجیره‌ای در فرآیند خرابی پیش‌رونده جهت پیشگیری از فروریزش سازه‌های قاب خمشی فولادی پرداخته شده است. عملکرد زنجیره‌ای پس از حذف ستون از سازه، یکی از مکانیسم‌های کمک به بازتوانی سازه برای رسیدن به تعادل ایستای جایگزین می‌باشد. در پلان ساختمانی با ارتفاعات متفاوت، پتانسیل خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف ستون‌ها در موقعیت‌های مختلف، متفاوت است بنابراین، بررسی عملکرد زنجیره‌ای در پیشگیری از ایجاد خرابی پیش‌رونده در این تحقیق نشان داد که سطح عملکرد سازه‌ها در طی فرآیند خرابی پیش‌رونده با استفاده از عملکرد زنجیره‌ای بهبود خواهد یافت. نتایج حاکی از آن است که پتانسیل خرابی پیش‌رونده با افزایش تعداد طبقات در سازه‌های قاب خمشی فولادی بررسی شده در این تحقیق کاهش می‌یابد. عملکرد زنجیره‌ای با افزایش تعداد طبقات ساختمان‌های مورد تحقیق، بهبود یافته و سازه‌ای با تعداد طبقات بیشتر، سهم بیشتری از این عملکرد در برابر حذف ستون خواهد داشت. بیشترین پتانسیل ایجاد خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مورد تحقیق به ترتیب از آن ستون‌های گوشه و سپس پیرامونی بوده است. این درحالی است که کم‌ترین پتانسیل ایجاد خرابی پیش‌رونده در این سازه‌ها به‌ترتیب متعلق به ستون‌های مرکزی و سپس داخلی بوده است.

۱۱. مراجع

[1] GSA2003 “Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects”; General Services Administration, Washington D. C., 2003.

[2] Kim, J.; An, D. “Evaluation of Progressive Collapse Potential of Steel Moment Frames Considering Catenary Action”; The Structural Design of Tall and Special Buildings 2009, 18, 455-465.

[3] Unified Facilities Criteria (UFC). “Design of Buildings to Resist Progressive Collapse”; (UFC4-023- 03) Dep't of Defence, 2009.

[4] Hamburger, R. O.; Whittaker, A. S. “Design of Steel Structures for Blast-Related Progresseive Collapse Resistance”; Modern Steel Construction 2004, 45-51.

[5] Byfield, M. P.; Paramasivam, S. “Catenary Action in Steel-Framed Building”; Structures and Buildings 2007, 160, 247-257.

[6] Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Buildings (Publication 360), Department of Technical Office, Develop Criteria and Earthquake Risk Reduction, 2006 (In Persian).

[7] FEMA 356. “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”; Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[8] SAP2000 (v14) “Analysis Reference Manual, Computers and Structures”; Inc., Berkeley, California, 2002.

[9] Marjanishvili, S.; Agnew, E. “Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis”; J. Perform. Constr. Facil. 2006, 20, 365–374.

[10] Kim, J.; Kim, T. “Assessment of Progressive Collapse-Resisting Capacity of Steel Moment Frames”; J. Construc. Steel Res. 2009, 65, 169-179.

[11] Seismic Design of Buildings Regulations, Housing and Building Research Center, Standing Committee Revised Regulations for Seismic Design of Buildings, Third Edition, 2800 (In Persian).

[12] Iranian National Building Code - 6th Chapter, Building Loads, Ministry of Housing and Urban Development, Department of Housing and Construction Office, Developing and Promoting National Regulations, Second Edition, 2006 (In Persian).

[13] Tenth Issue of Iranian National Building Code, Planning and Construction of Steel, Ministry of Housing and Urban Development, Department of Housing and Construction Office. Developing and Promoting the National Building Regulations, 2008 (In Persian).

[14] Kim, J.; Kim, T. “Investigation of Progressive Collapse-Resisting Capability of Steel Moment Frames Using Push-Down Analysis”; J. Perform. Construc. Facil. 2009, 23, 327-335.