

Progressive collapse investigation of buildings with concentric and eccentric braced frames using nonlinear procedure

Reza Jalali Larijani¹, Heydar Dashti Nasserabadi^{2*}, Iman Aghayan³

1- Ph.D Candidate in Civil Engineering (Structural Engineering), Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Chaloos, Iran

2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Chaloos, Iran

3 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT

These days a lot of dangers threaten the construction structures. Many abnormal loads are not considered in the design of structures. The column sudden removal can occur due to the errors during construction, explosion, shock or any other abnormal causes in the structure. If the structural response leads to a rebalance during the sudden column removal, this causes the structure to remain safe, and if the force balance is not created in the structure, it can cause Progressive Collapse (PC) in the structures. Structures are not designed toward PC scenarios, such as the sudden column removal. The assessment of structures behavior in PC scenario lead to a correct understanding about the resistance of structures in these scenarios. This research investigated the behavior and response of braced steel structures to the sudden column removal using the alternate load path method and nonlinear static and dynamic analysis. For this purpose, the 10 and 20-story structures were modeled nonlinearly by OpenSees software after the initial design and they are subjected under sudden column removal. Static and dynamic pushdown curves of the structures are considered as a criterion to assess the behavior of structures. The results showed that not only the type of braces is effective on the behavior and response of the structures during the PC scenario, but also the geometry of bracing in this scenario is.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 October 2019

Revise Date: 13 January 2020

Accept Date: 16 February 2020

Keywords:

Progressive collapse
Column sudden removal
Steel braced frame
Concentric brace
Eccentric brace

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.203435.1964>

*Corresponding author: Heydar Dashti Nasserabadi.
Email address: heydardashti.n@gmail.com

بررسی خرابی پیشرونده در ساختمانهای مهاربندی شده همگرا و واگرا با استفاده از

تحلیل غیرخطی

رضا جلالی لاریجانی^۱، حیدر دشتی ناصرآبادی^{۲*}، ایمان آقاییان^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، ایران

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

امروزه خطرات زیادی سازه‌های ساختمانی را تهدید میکند. بسیاری از بارگذاری‌های غیرعادی در طراحی سازه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. حذف ناگهانی ستون می‌تواند در اثر اشتباهات ناشی از ساخت، انفجار، ضربه و یا هر علت غیرعادی دیگری در سازه رخ دهد. پاسخ سازه در سناریوی حذف ناگهانی ستون در صورتی که به تعادل مجدد منتهی شود باعث ایمن ماندن سازه و در صورتی که تعادل نیرویی در سازه ایجاد نشود می‌تواند باعث ایجاد خرابی پیشرونده در سازه‌ها شود. سازه‌ها برای سناریوهای خرابی پیشرونده مانند حذف ناگهانی ستون طراحی نمی‌شود. ارزیابی رفتار سازه‌ها در سناریوی خرابی پیشرونده می‌تواند به درک صحیحی از مقاومت سازه‌ها در این سناریوها بیانجامد. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش مسیر بار جایگزین و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی رفتار و پاسخ سازه‌های مهاربندی شده فولادی به حذف ناگهانی پرداخته شود. به این منظور سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه پس از طراحی اولیه به صورت غیرخطی در نرم‌افزار *Opensees* مدل‌سازی شده و در معرض حذف ستون قرار گرفته‌اند. منحنی‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها به عنوان معیار ارزیابی رفتار سازه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داد که تنها نوع مهاربندها بر رفتار و پاسخ سازه‌ها در سناریوی خرابی پیشرونده مؤثر بوده بلکه هندسه مهاربند نیز در این سناریو مؤثر است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد وجود قید فشاری در هندسه ضربدری و هفتی باعث کاهش پاسخ این سازه‌ها به حذف ناگهانی ستون است. با افزایش تعداد طبقات اثر حذف ناگهانی ستون بر پاسخ سازه کاهش می‌یابد و سازه‌های سه بعدی پاسخ کمتری را نسبت به قاب دو بعدی از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: خرابی پیشرونده، حذف ناگهانی ستون، قاب فولادی مهاربندی، مهاربند همگرا، مهاربند واگرا

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.203435.1964	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.203435.1964	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۱۱/۲۷	۱۳۹۸/۱۱/۲۷	۱۳۹۸/۱۰/۲۳	۱۳۹۸/۰۷/۱۳
حیدر دشتی ناصرآبادی heydardashti.n@gmail.com					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

یکی از مکانیزم‌های خرابی سازه که توجه زیادی را در دهه‌های اخیر به خود اختصاص داده است خرابی پیشرونده می‌باشد. خرابی پیشرونده شامل یک مجموعه خرابی‌هاست که منجر به فروریختگی جزئی یا کلی در سازه می‌شود. یک یا چند عضو سازه‌ای به دلیل تصادف یا انفجار ناگهان خراب می‌شوند و هر بازتوزیع باری باعث خرابی دیگر المان‌های سازه‌ای می‌شود و ساختمان به‌طور پیشرونده منهدم می‌شود [۱]. در ابتدا، توجه جامعه مهندسی بعد از انهدام بخشی از ساختمان رونان پوینت^۱ در لندن در سال ۱۹۶۸ به این موضوع معطوف شد. بعد از حوادث ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، چندین کمیته استانداردسازی برای بهبود استانداردهای روش‌های طراحی در برابر خرابی پیشرونده شروع بکار کردند [۱]. این پدیده همچنین می‌تواند برای سازه‌های طراحی شده بر اساس آئین‌نامه‌های جاری، حین رخداد زلزله‌های شدید مشکلاتی را به وجود آورد و حتی منجر به ویرانی کل سازه گردد. به عبارت دیگر، هرگونه ضعف در طراحی و یا اجرای المان‌های سازه‌ای ممکن است باعث به وجود آمدن پدیده خرابی پیشرونده در سازه‌ها حین بارگذاری لرزه‌ای نیز گردد [۲]. در مجموعه "بهترین عملکرد برای کاهش خرابی پیشرونده" که توسط NIST منتشر شده است، خطرات بالقوه بار غیرطبیعی مانند انفجار و خطرات طبیعی مانند زلزله می‌تواند باعث خرابی پیشرونده شود. در ایالات متحده آمریکا اداره سرویس‌دهی عمومی (GSA) [۳] و وزارت دفاع (DOD) [۴] اطلاعات گسترده و دستورالعمل‌هایی را ارائه دادند که شامل راهکارهایی برای مقاوم کردن سازه‌های ساختمانی در برابر خرابی پیشرونده می‌باشد. دو روش دیگر که برای تأمین مقاومت در برابر خرابی پیشرونده مورد استفاده قرار می‌گیرند روش غیرمستقیم و روش‌های مستقیم می‌باشند [۵ و ۶]. در روش غیرمستقیم مقاومت در برابر خرابی پیشرونده با ایجاد پیوستگی، شکل‌پذیری و افزایش مقاومت با ایجاد درجات نامعینی بالاتر در سازه فراهم می‌شود که بوسیله جزئیات مناسب بست و اتصالات، جانمایی صحیح دیوارها و ستون‌ها، صفحات توکار جهت کنترل گسترش خرابی و همچنین در نظر گرفتن جزئیات لرزه‌ای انجام می‌گیرد تا ساختمان به صورت یکپارچه عمل کند که در این صورت انسجام کلی سازه افزایش می‌یابد [۷]. روش مستقیم به میزان زیادی وابسته به روش تحلیل سازه است. مقاومت در برابر خرابی پیشرونده، از طریق بالا بردن مقاومت اعضای کلیدی سازه‌ای در برابر بارهای ویژه و یا از طریق پل زدن در عرض ناحیه خرابی موضعی فراهم می‌شود که به دو روش تقسیم می‌شوند: روش مقاومت موضعی ویژه و روش مسیر جایگزین انتقال بار [۸].

کفیر^۲ (۲۰۰۹) مفاهیم، استانداردها و فرمول‌های موجود در بحث خرابی پیشرونده را بررسی کرد [۹]. کیم^۳ و همکاران (۲۰۱۱) تاثیر استفاده از جاذب‌های انرژی مانند میراگر اصطکاکی را در کاهش خطرات ناشی از خرابی پیشرونده بررسی کردند [۱]. کیم^۲ (۲۰۰۹) ظرفیت سازه‌های فولادی در معرض خرابی پیشرونده را با هم مقایسه کردند [۱۰]. مرجانی^۴ و همکاران (۲۰۰۶) روش‌های مختلف ارزیابی در تحلیل‌های خرابی پیشرونده را بررسی نمودند [۱۱]. گیلسانز^۵ و همکاران (۲۰۰۳) روش‌های ساده‌ای را در بررسی پتانسیل خرابی پیشرونده ارائه داده‌اند [۱۲]. سای^۶ و همکاران (۲۰۰۸) مقاومت سازه‌های بتن آرمه مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای را در سناریوی خرابی پیشرونده بررسی کرده‌اند [۱۳]. سانگ^۷ (۲۰۱۰) به صورت آزمایشگاهی و عددی پتانسیل قاب خمشی فولادی را در برابر خرابی پیشرونده بررسی کرده است [۱۴]. گراسیمیدز^۸ و همکاران (۲۰۱۱) اثرات حذف ناگهانی ستون را در سازه‌های قاب خمشی بررسی نمودند [۱۵]. مک-کای^۹ (۲۰۱۲) با استفاده از روش مسیر بار جایگزین پاسخ دینامیکی سازه‌ها و ضریب تشدید بار را در سناریوی خرابی پیشرونده بررسی نمودند [۱۶]. مرادی و توکلی (۲۰۱۸) به صورت گسترده به بررسی پتانسیل خرابی پیشرونده با استفاده از مفهوم شاخص تنومندی پرداختند [۱۷]. لاریجانی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی دو ساختمان ۹ و ۶ طبقه فولادی موجود با سیستم‌های ساختمانی دوگانه در ۹

¹ Ronan point

² Kfir

³ Kim

⁴ Marjanishvili

⁵ Gilsanz

⁶ Tsai

⁷ Song

⁸ Gerasimidis

⁹ McKay

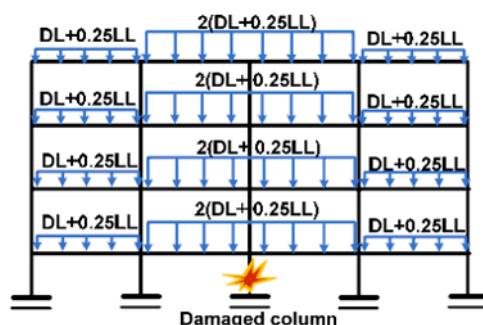
طبقه و سیستم قاب ساختمانی ساده در ۶ طبقه پرداختند. نتایج نشان داد که ساختمان ۹ طبقه با سیستم دو گانه نسبت به ساختمان ۶ طبقه با سیستم قاب ساختمانی ساده دارای پتانسیل کمتری در برابر خرابی پیشرونده بود [۱۸]. لاریجانی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از روش تحلیل استاتیکی خطی به بررسی اثرات ناشی از حذف ستون در سازه‌های دارای مهاربند مختلف پرداختند [۱۹]. فیوض و همکاران (۱۳۹۴) قاب‌های مهاربندی هم محور را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داده است که سازه با افزایش تعداد طبقات عملکرد مناسب‌تری به هنگام رویارویی با خرابی پیشرونده از خود نشان می‌دهد ولی افزایش طول دهانه تیرها باعث کاهش مقاومت سازه در برابر خرابی پیشرونده می‌شود [۲۰]. سلیمی و همکاران (۱۳۹۶) نیز به ارزیابی مقاومت سازه‌های فولادی دارای مهاربند واگرا تحت خرابی پیشرونده پرداختند. نتایج آنها نشان داده است حذف ستون گوشه حالت بحرانی‌تری را نسبت به سایر حالات حذف ستون دارد [۲۱]. نتایج تحقیق حسینی و قدرتی (۱۳۹۷) نشان داد که در نظر گرفتن اثرهای پایداری جانبی سازه سبب افزایش مقادیر DCR در سناریوی حذف ناگهانی ستون می‌شود [۲۲]. لیو و ژو (۲۰۱۹) اثر حذف ناگهانی ستون را در قاب‌های دارای مهاربند هشتی و ضربدری بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد به طور کلی سیستم مهاربند ضربدری پاسخ کمتری را نسبت به مهاربند هشتی از خود نشان داده است [۲۳]. سلماسی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تحلیل غیرخطی استاتیکی ظرفیت سیستم سازه‌ای مهاربند واگرا را بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان داده است این سازه‌ها ظرفیت کافی را در برابر حذف عضو دارند [۲۴]. ناجی و خداوردیزاده (۲۰۱۹) ظرفیت سازه‌های فولادی دارای مهاربند همگرا و واگرای هفتی هشتی را تحت خرابی پیشرونده با استفاده از تحلیل غیرخطی استاتیکی بررسی کردند. نتایج تحلیل آنها نشان داده است این سیستم‌های سازه‌ای دارای ظرفیت کافی در برابر خرابی پیشرونده هستند [۲۵].

همانطور که پیش از این عنوان شده است تحقیقات فراوانی در زمینه خرابی پیشرونده در سیستم‌های سازه‌ای انجام شده است اما همچنان یک تحقیق جامع که با تمرکز بر نوع سیستم سازه‌ای و با شرایط یکسان عملکرد سیستم‌های فولادی را به صورت یکجا بررسی کند انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق سعی شده است تا به صورت یکجا عملکرد سازه‌های فولادی با سیستم مهاربندی مختلف تحت سناریوی حذف ناگهانی ستون بررسی شود. با توجه به تنوع سیستم‌های سازه‌ای مهاربندی فولادی در این تحقیق، پتانسیل خرابی پیشرونده در سازه‌های فولادی دارای مهاربندهای مختلف همگرا و واگرا بررسی شده است. در این تحقیق از دو روش استاتیکی و دینامیکی سناریوی حذف ستون شبیه برای دو حالت خرابی موضعی شبیه‌سازی شده است. در روش استاتیکی یا همان تحلیل غیرخطی استاتیکی ظرفیت سازه‌ها در برابر خرابی پیشرونده در اثر حذف ناگهانی ستون بررسی شده است. در تحلیل دینامیکی غیرخطی پاسخ دینامیکی سازه‌ها به حذف ناگهانی ستون بررسی شده است. دو موقعیت خرابی در طبقه همکف به عنوان سناریوهای خرابی پیشرونده در نظر گرفته شده است. در ادامه روش تحلیل و مدل‌های سازه‌ای بررسی شده است.

۲- روش تحقیق

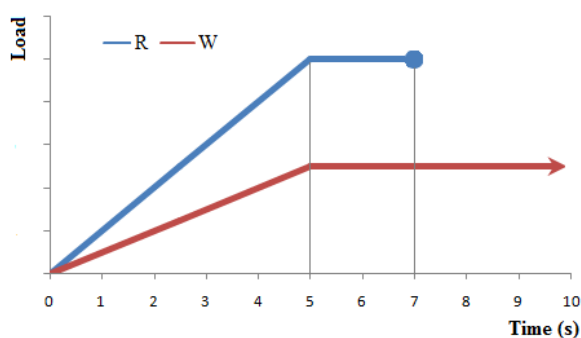
همانطور که بیان شده روش مسیر بار جایگزین یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در ارزیابی پتانسیل خرابی پیشرونده می‌باشد. در این روش با فرض حذف یک المان باربر و توزیع مجدد بارها سعی می‌شود تا مقاومت اعضای پیرامونی عضو حذف شده در برابر اضافه بار ناشی از حذف بررسی شود. در واقع در این روش سعی می‌شود تا با ایجاد مسیرهای جایگزین بار المان باربر حذف شده به نحوی انتقال یابد تا بازتوزیع نیروها باعث ایجاد تعادل مجدد در سازه شود و ایجاد خرابی‌های بعدی از سازه دور شود. بر اساس GSA بررسی سناریوی خرابی پیشرونده با استفاده از مسیر بار جایگزین مبتنی بر حذف المان باربر (به طور مثال ستون) می‌باشد. المان‌های باربر از سازه حذف شده و سازه بدون در نظر گرفتن این عضو در معرض بارهای تعیین شده بر اساس ترکیب بارهای خاص قرار می‌گیرد. سپس بر اساس ضوابطی تعیین می‌شود که آیا سازه در برابر حذف عضو سالم باقی می‌ماند یا دچار خرابی می‌شود. در ارزیابی پتانسیل خرابی پیشرونده در اثر حذف ناگهانی ستون استاندارد GSA دو روش را بر اساس مسیر بار جایگزین پیشنهاد می‌دهد. در روش اول از ابتدا عضو باربر (ستون) از سازه حذف شده و سپس بار ثقلی به صورت گام‌های پی در پی به سازه اعمال شده و تغییر مکان قائم عضو حذف شده بر اساس ضریب بار ثقلی اعمال شده به عنوان منحنی تحلیل غیرخطی استاتیکی رسم شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف از این روش، ارائه

ظرفیت سازه در برابر حذف ناگهانی ستون و مقابله با ایجاد پدیده خرابی پیشرونده در سازه می‌باشد. در این روش معمولاً از ترکیب بار مربوط به بارهای ثقلی زنده و مرده استفاده می‌شود. در این روش بار ثقلی در دهانه آسیب دیده (حذف عضو باربر) در ضریبی ضرب می‌شود. در این تحقیق تحلیل‌ها بر اساس استاندارد GSA2003 انجام شده است بنابراین ترکیب بار ثقلی در ضریب ۲ ضرب شده است. شکل شماتیک ترکیب بار اعمالی در آنالیز غیر خطی استاتیکی در شکل ۱ نشان داده شده است.

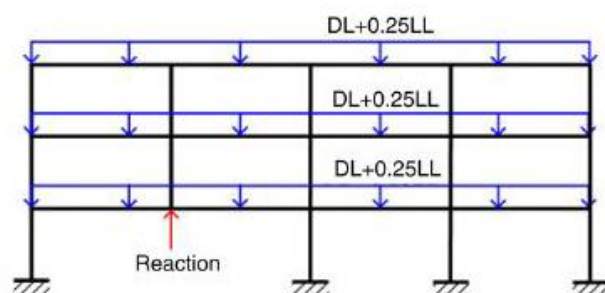


شکل ۱: بار قائم اعمال شده در تحلیل استاتیکی غیر خطی مطابق آیین‌نامه GSA 2003

در روش دوم استاندارد GSA بر مبنای روش مسیر بار جایگزین روش غیرخطی دینامیکی را ارائه می‌دهد. در این روش هدف بررسی پاسخ سازه به حذف ناگهانی عضو باربر می‌باشد. بر خلاف روش قبلی این روش تابع زمان است. پاسخ دینامیکی به حذف ناگهانی عضو باربر به صورت واقع بینانه رفتار سازه در برابر حذف ناگهانی عضو باربر را نشان می‌دهد. در این تحلیل بار ثقلی در ابتدا به صورت خطی در مدت ۵ ثانیه به سازه وارد شده و سپس ۲ ثانیه ثابت می‌ماند تا ارتعاشات ناشی از بارگذاری به حداقل برسد. در ثانیه ۷ عضو باربر و یا قید جایگزین آن از سازه حذف و جابجایی قائم نقطه آسیب دیده بر اساس زمان به عنوان منحنی پاسخ دینامیکی سازه که نمایانگر پاسخ سازه به حذف ناگهانی ستون می‌باشد ارائه می‌گردد. در روشی معمول برای انجام تحلیل غیر خطی دینامیکی ابتدا سازه تحت بار ثقلی تحلیل شده و سپس عکس‌العمل ستون حذف شده محاسبه می‌گردد. سپس عضو مورد نظر از سازه حذف شده و عکس‌العمل متناظر با آن به صورت معکوس در نقطه آسیب دیده اعمال می‌شود. در ثانیه ۷ عکس‌العمل وارد بر سازه از سازه حذف می‌شود. در شکل ۲ بارگذاری و ترکیب بار در تحلیل غیر خطی دینامیکی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲: تحلیل غیر خطی دینامیکی بر اساس استاندارد GSA

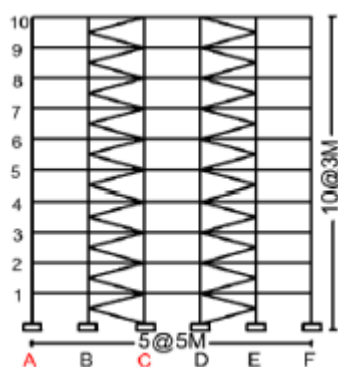
در این تحقیق سعی شده است تا با ترکیب روش ارائه شده در جهت تحلیل غیرخطی دینامیکی در استاندارد GSA و قابلیت حذف المان در طی تحلیل، سناریوی حذف ناگهانی ستون به صورتی واقعی مدل شود. در این تحقیق فرض شده است بار ثقلی با ترکیب DL+0.25LL به صورت خطی همانند شکل ۲-ب (بدون منحنی R) به مدت پنج ثانیه به سازه وارد شود. سپس همانند منحنی w در شکل ۲-ب به صورت ثابت و تابعی از زمان ادامه یابد. برای مدلسازی حذف ناگهانی ستون فرض شده است در ثانیه هفتم آنالیز، ستون‌های مورد نظر از سازه حذف و سازه شروع به ارتعاش کند. مزیت این روش نسبت به روش استاندارد GSA این می‌باشد که تغییر شکل‌های محوری ستون محذوف بررسی می‌گردد.

۳- مدل عددی

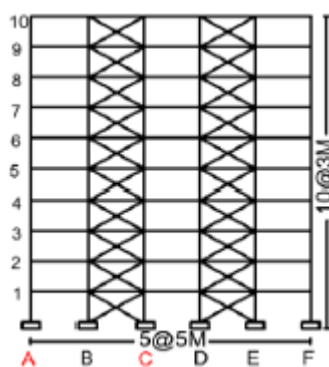
به منظور بررسی اهداف تحقیق سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه دارای مهاربندهای همگرا و واگرا (شکل ۳) طراحی و مدلسازی شده اند. سازه‌ها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران بارگذاری لرزه‌ای شده و سپس بر اساس روش LRFD طراحی شده‌اند. در طراحی سازه فرض شده است سازه‌ها در منطقه با لرزه‌خیزی زیاد و زمین نوع ۳ واقع‌اند. بار ثقلی در طراحی برای بار زنده و مرده به ترتیب ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. در طراحی سازه‌های فولادی نیز فرض شده است فولاد از نوع ST37 می‌باشد. برای طراحی سازه‌ها ابتدا فرض شده است سازه‌ها در یک قاب مربعی با ۵ دهانه ۵ متری واقع‌اند. ارتفاع طبقات نیز یکسان و برابر ۳ متر در نظر گرفته شده است. سازه‌ها به صورت سه بعدی در نرم‌افزار Etabs طراحی شده و سپس قاب پیرامونی مهاربندی شده آنها به عنوان مدل‌های مورد نظر تحلیل استخراج و سپس در نرم‌افزار Opensees به صورت غیرخطی مدلسازی و بارگذاری شده است. مقاطع سازه‌ای استفاده شده در مدل‌های مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است. مدل‌های سازه‌ای مورد نظر این تحقیق در تیپ ۱۰ طبقه در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق سیستم‌های سازه‌ای، تیپ‌های طبقاتی و محل خرابی موضعی به عنوان حالات بررسی تحقیق در نظر گرفته شده است. در هر مدل دو بعدی ظرفیت سازه در برابر حذف ستون‌ها و پاسخ سازه‌ها به حذف ناگهانی ستون با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیر خطی به عنوان دو هدف این تحقیق بررسی شده است. برای سهولت در ارائه نتایج برای هر مدل سازه‌ای یک نام خاص انتخاب شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. برای سیستم سازه‌ای قطری از نام Diag، برای هفتی از V، برای هشتی از In V، برای زانویی از K و برای ضربدری از X استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات مقاطع سازه‌ای

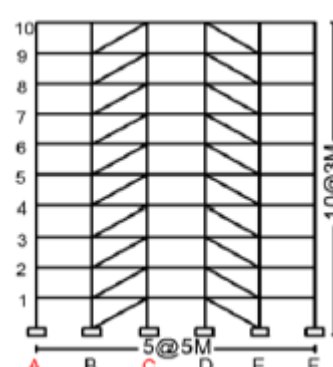
Columns	Beams	Braces
B175×175×15	IPE160	B125×125×10
B200×200×15	IPE180	B125×125×12
B200×200×20	IPE200	B175×175×15
B225×225×20	IPE220	B200×200×15
B250×250×20	IPE270	B200×200×20
B275×275×20	IPE300	B225×225×20
B300×300×25	IPE330	B225×225×25
B325×325×30	IPE360	B250×250×20
B350×350×30	IPE400	B250×250×25
B375×375×30		
B400×400×40		



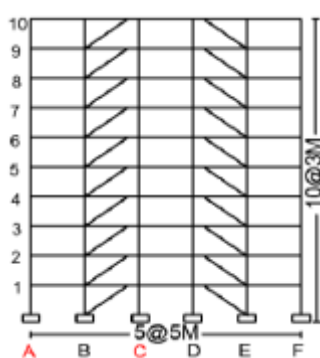
(ج)



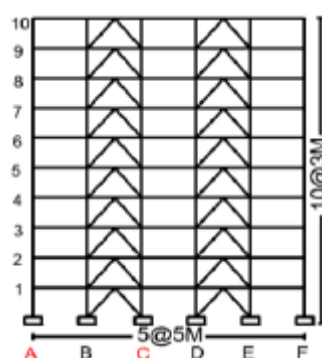
(ب)



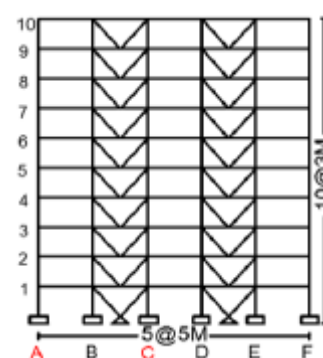
(الف)



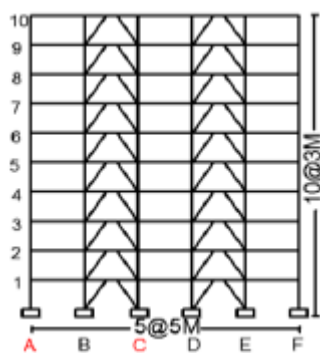
(و)



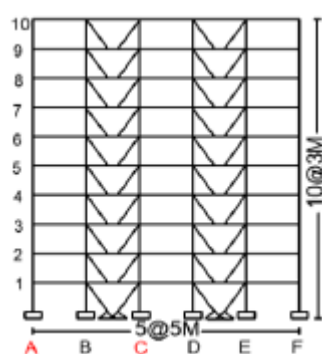
(ه)



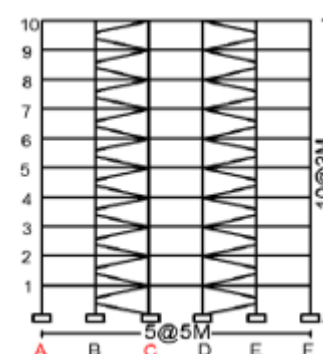
(د)



(ط)



(ح)



(ز)

شکل ۳: مدل‌های غیرخطی سازه‌ای و حالات خرابی موضعی الف) سیستم همگرای قطری (Diag) ب) ضربدری (X) ج) زانویی (K) د) هفتی (V) ه) هشتی (In V) و) سیستم واگرای قطری (Diag) ز) زانویی (K) ح) هفتی (V) ط) هشتی (In V)

۳-۱- صحت سنجی

برای ارزیابی اعتبار نتایج و صحت‌سنجی از یک مدل عددی استفاده شده است. برای انجام اعتبار نتایج از مدل عددی توکلی و کیاکجوری (۲۰۱۴) استفاده شده است. آنها قاب‌های فولادی دو بعدی با سیستم قاب خمشی را به صورت خطی و غیرخطی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی کرده و در معرض حذف ناگهانی ستون قرار دادند و نتایج را ارزیابی کردند [۲۶]. آنها در تحقیق خود از مدل‌های دو بعدی سه، پنج و ده طبقه استفاده کرده‌اند که برای اعتبارسنجی، قاب ده طبقه آنها مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از تحلیل حذف

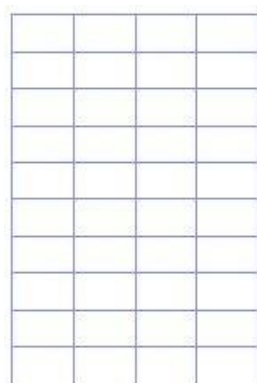
ناگهانی ستون با مدل آنها مقایسه شده است. مدل عددی تحقیق توکلی و کیاکجوری و مدل عددی ایجاد شده در تحقیق حاضر در شکل ۴ نشان داده شده است. آنها پس از ایجاد یک مدل اجزای محدود با استفاده از تحلیل پوش دان دینامیکی پاسخ سازه به حذف ناگهانی ستون گوشه این قاب را بررسی کردند. نتایج حاصل از حذف ناگهانی ستون گوشه در دو حالت تحلیل پوش دان خطی و غیرخطی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج تحقیق آنها نشان داده است پاسخ دینامیکی سازه غیرخطی بیشتر از سازه خطی است. برای اعتبار سنجی به منظور ارزیابی رفتار دقیق سازه، منحنی غیرخطی ارائه شده توسط آنها معیار اعتبارسنجی قرار گرفته است. بنابراین برای صحت‌سنجی نتایج مدل ده طبقه آنها در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شده و سپس در عرض حذف ناگهانی ستون در ناحیه گوشه طبقه همکف قرار گرفته است. برای مدل‌سازی از المان با پلاستیسیته گسترده استفاده شده است. برای مشخصات غیرخطی مصالح از مصالح Steel02 و برای المان‌ها از المان nonlinearBeamColumn استفاده شده است. قاب مورد نظر در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شده و پس از حذف ناگهانی ستون قرار گرفته است و منحنی غیرخطی دینامیکی آن استخراج و با مدل توکلی و کیاکجوری مقایسه شده است. برای انجام تحلیل پوش دان دینامیکی از روش مسیر بار جایگزین استفاده شده است. ابتدا بار ثقلی در مدت ۵ ثانیه به صورت خطی به سازه اعمال شده است و سپس به مدت ۲ ثانیه ثابت باقیمانده و در ثانیه هفتم ستون گوشه طبقه همکف از سازه حذف شده و پاسخ دینامیکی سازه استخراج شده و با مدل توکلی و کیاکجوری مقایسه شده است. منحنی‌های شکل ۴ نشان می‌دهد که سازه پس از حذف ناگهانی ستون چه مقداری جابجایی قائم خواهد داشت. بر اساس این شکل ابتدا سازه جابجایی ماکزیمم دارد و سپس پس از چند ارتعاش به تعادل می‌رسد. در شکل ۴ نتایج صحت‌سنجی در این تحقیق (رنگ زرد) با مدل عددی توکلی و کیاکجوری (رنگ قرمز) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد انطباق مناسبی بین مدل عددی حاضر و نتایج تحلیل غیرخطی توکلی و کیاکجوری وجود دارد.

۴- بررسی نتایج تحلیل

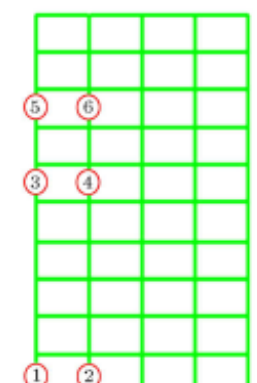
۴-۱- نتایج تحلیل غیر خطی استاتیکی

همانطور که بیان شد تحلیل غیرخطی استاتیکی پیش از همه نشان دهنده ظرفیت سازه در برابر تحمل بار ثقلی در اثر حذف ستون می‌باشد. در این تحلیل جابجایی قائم نقطه آسیب دیده به ضریب بار ثقلی اعمالی به عنوان منحنی تحلیل غیرخطی استاتیکی معرفی شده است. در شکل ۵ و ۶ منحنی تحلیل غیرخطی استاتیکی در مدل‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه نشان داده شده است.

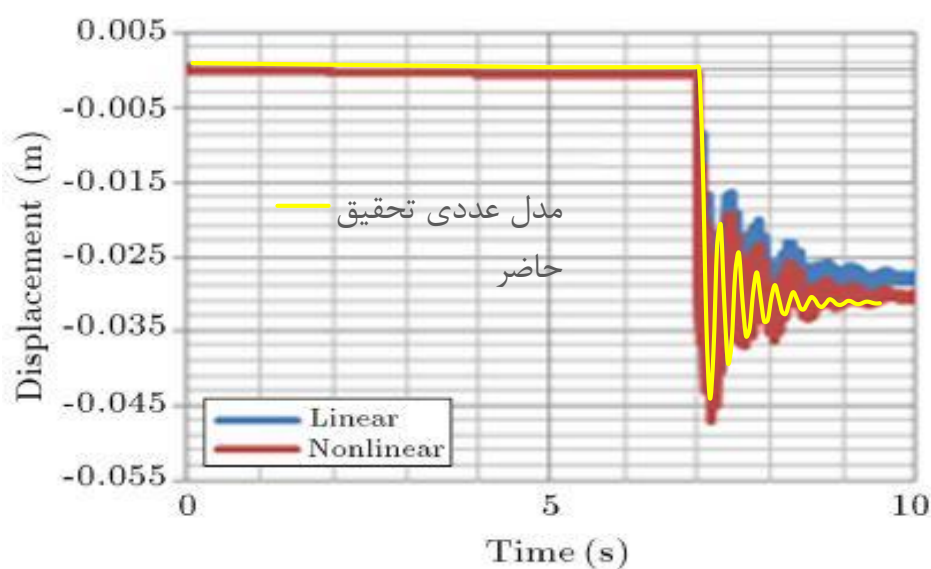
منحنی تحلیل غیرخطی استاتیکی نشانی از ظرفیت سازه در برابر بار ثقلی در سناریوی حذف ناگهانی ستون می‌باشد. در شکل ۵ و ۶ منحنی‌های غیرخطی استاتیکی برای دو حالت خرابی ستون گوشه و ستون میانی در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه دارای سیستم‌های باربرجانبی مختلف نشان داده شده است. این منحنی‌ها دارای دو ویژگی هستند ویژگی اول ضریب بار متناظر با جابجایی تسلیم می‌باشد. هرچه این مقدار بیشتر باشد ظرفیت الاستیک سازه در مقابله با بار ثقلی بیشتر می‌باشد. پارامتر بعدی ضریب بار متناظر با جابجایی نهایی می‌باشد. این ضریب نشان دهنده ظرفیت نهایی سازه در مقابله با بار ناشی از حذف ستون می‌باشد. هرچه ظرفیت بار نهایی و تسلیم در موقعیت‌های مختلف بیشتر باشد سازه توانایی و ظرفیت بیشتری در جهت تحمل اضافه بار ناشی از حذف ستون در روش مسیر بار جایگزین خواهد داشت. در شکل ۵- الف مشاهده می‌شود ضریب بار در جابجایی تسلیم کمتر از یک می‌باشد این مقدار نشان می‌دهد سازه‌های ۱۰ طبقه دارای مهاربند هم‌محور هنگامی که در معرض حذف ناگهانی ستون قرار می‌گیرند دارای پتانسیل خرابی پیشرونده هستند اما در مورد وقوع قطعی خرابی پیشرونده در این سازه‌ها نمی‌توان اظهار نظر کرد. برای ارزیابی قطعی وقوع یا عدم وقوع خرابی پیشرونده نیاز به انجام تحلیل غیرخطی دینامیکی می‌باشد.



(ب)



(ف)

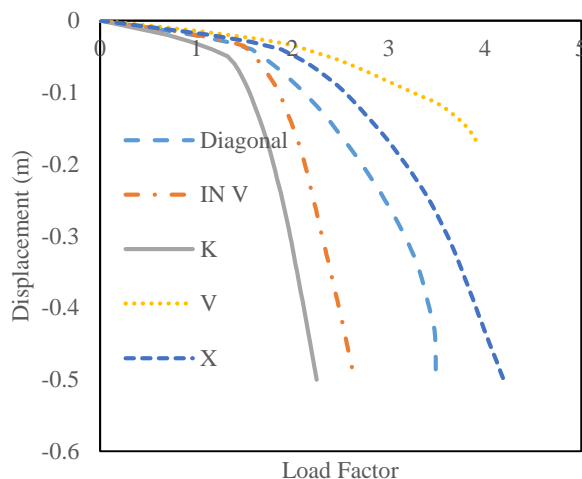


(ج)

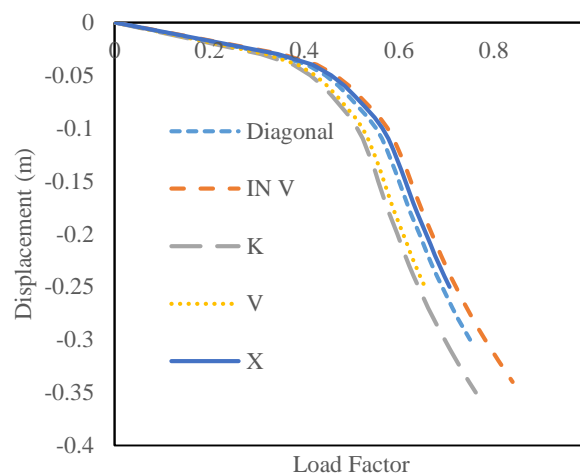
شکل ۴: ارزیابی اعتبار نتایج تحلیل با مقایسه با مدل عددی توکلی و کیاچوری (الف) مدل عددی تحقیق توکلی و کیاچوری (ب) مدل عددی ایجاد شده در تحقیق حاضر (ج) مقایسه نتایج

شکل ۵-ب منحنی‌های تحلیل غیرخطی استاتیکی در سازه‌های ۱۰ طبقه دارای مهاربند مختلف را هنگامی که خرابی موضعی در ستون میانی اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد. بر اساس این شکل ضریب بار متناظر با جابجایی تسلیم در تمامی مدل‌ها بیشتر از ۱ می‌باشد این مقدار نشان می‌دهد در اثر حذف ستون میانی در این سیستم‌های سازه‌ای هیچ یک از المان‌ها به دوران یا جابجایی قائم تسلیم نخواهند رسید و سازه از وقوع خرابی پیشرونده دور می‌باشد. بررسی منحنی‌های غیر خطی استاتیکی در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه نشان می‌دهد در تمامی مدل‌های سازه‌ای سازه‌های ۲۰ طبقه دارای ضریب بار بیشتر و پتانسیل کمتری در سناریوی حذف ناگهانی ستون می‌باشد. در واقع با افزایش تعداد طبقات پتانسیل خرابی پیشرونده در اثر حذف ناگهانی ستون‌های طبقه اول کاهش می‌یابد و سازه ایمنی و مقاومت بیشتری پیدا می‌کند. همچنین بررسی منحنی غیرخطی استاتیکی سیستم‌های سازه‌ای نشان می‌دهد در سازه‌های دارای مهاربند هم‌محور ضربدری (X) و هفتی (V) و برون‌محور هفتی (V) دارای ضریب بار و مقاومت بیشتری در این سناریو می‌باشد. در واقع اگر مهاربندها بتوانند تا

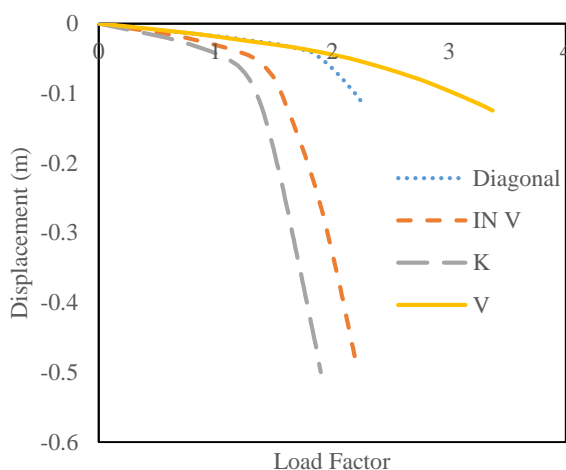
حدودی نقش قید حذف شده را در سازه ایجاد نمایند سازه ایمنی بیشتری خواهد داشت. در شکل ۷ نمونه‌ای از تغییر شکل‌های سازه‌های مهاربندی هم‌محور هفتی (V) و هشتی (IN-V) در تحلیل پوش غیرخطی استاتیکی نشان داده شده است.



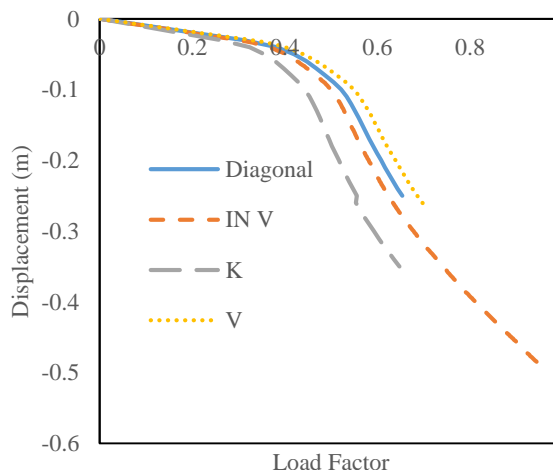
ب) طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون میانی



الف) طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون گوشه



د) ۱۰ طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون میانی

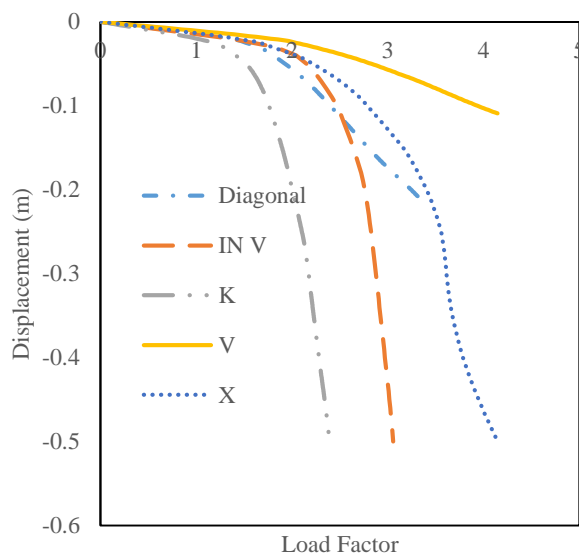


ج) ۱۰ طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون گوشه

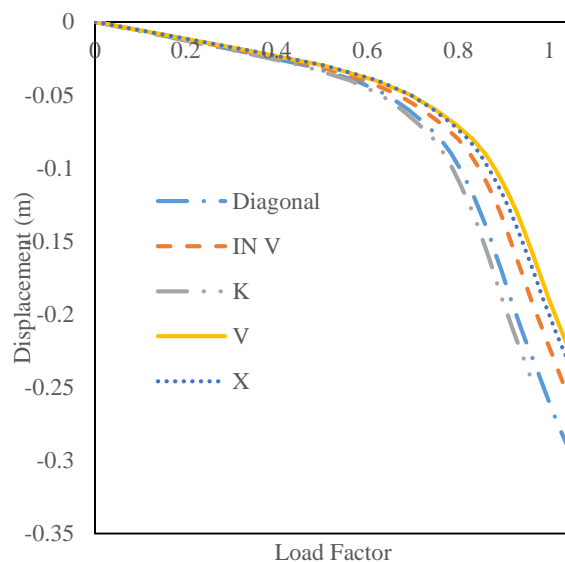
شکل ۵: منحنی تحلیل غیرخطی استاتیکی سازه‌های ده طبقه دارای مهاربندی همگرا و واگرا

بر اساس شکل و منحنی‌های تحلیل غیرخطی مربوط به سازه‌های دارای مهاربند هفتی و هشتی می‌توان نتیجه گرفت سازه دارای مهاربند هفتی به طور مستقیم در نقطه آسیب‌دیده دارای قید فشاری می‌باشد. ولی در سیستم دارای مهاربند هشتی تنها مهاربند طبقه بالا وجود دارد که آن هم نقطه چشمه کششی را ایجاد می‌کند. در واقع حذف ستون باعث می‌شود یک جریان کششی در سازه ایجاد شود و المان‌ها باید این جریان کششی را تحمل نمایند. وجود مهاربند هفتی در نقطه آسیب دیده علاوه بر تحمل بخشی از فشار ناشی از حذف ستون باعث می‌شود جریان انرژی کششی در سازه کم شده و ظرفیت تحمل نیرو نیز افزایش یابد. بنابراین در سناریوی

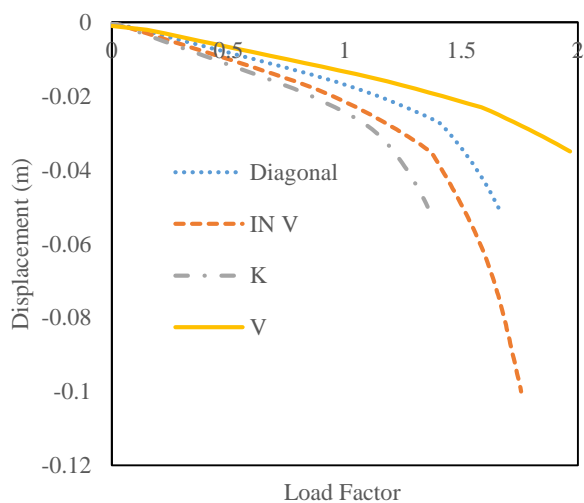
خرابی پیشرونده علاوه بر محل خرابی، تعداد طبقات و سیستم سازه‌ای، هندسه سازه نیز دارای اهمیت می‌باشد. چراکه اگر هندسه سازه-ای به گونه‌ای عمل کند که جریان نیروی کششی در سازه کم شود، مقاومت سازه در سناریوی خرابی پیشرونده نیز افزایش خواهد یافت.



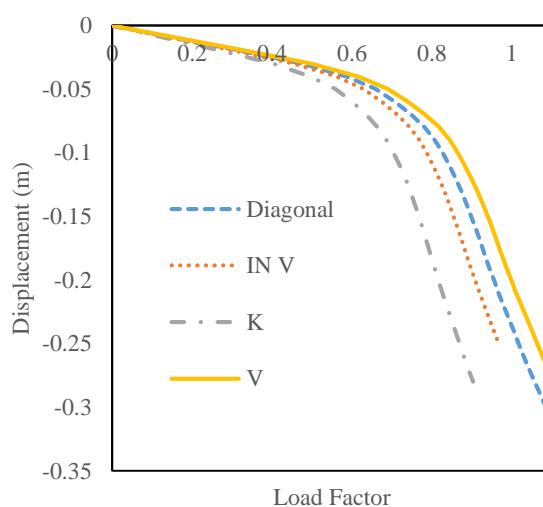
ب) طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون میانی



الف) طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون گوشه

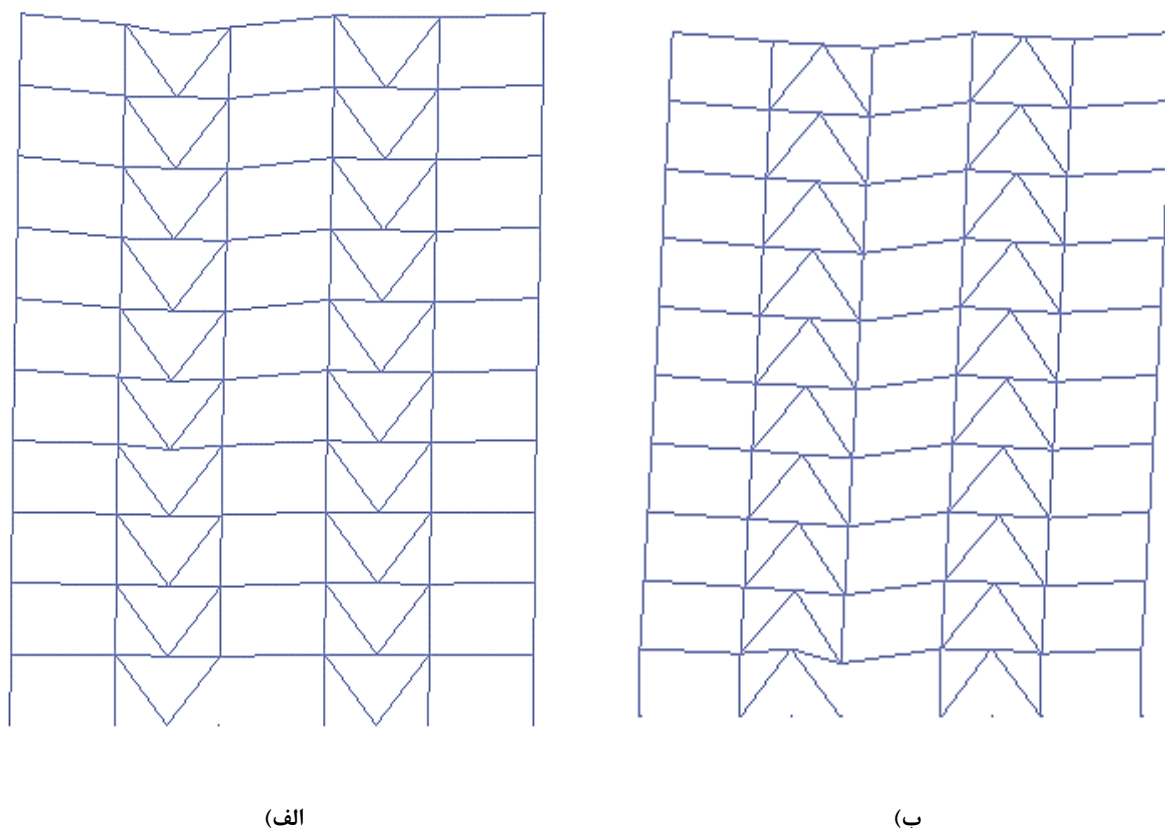


د) طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون میانی



ج) طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون گوشه

شکل ۶: منحنی تحلیل غیرخطی استاتیکی سازه‌های بیست طبقه دارای دو دهانه مهاربندی همگرا و واگرا



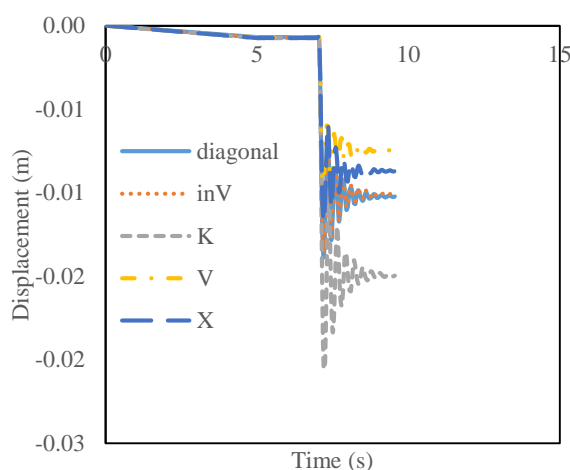
شکل ۷: تغییر شکل در طی تحلیل غیر خطی استاتیکی در سازه‌های الف) مهاربندی هم‌محور هفتی (V) ب) مهاربند هم‌محور هشتی IN- (V)

۴-۲- نتایج تحلیل غیر خطی دینامیکی

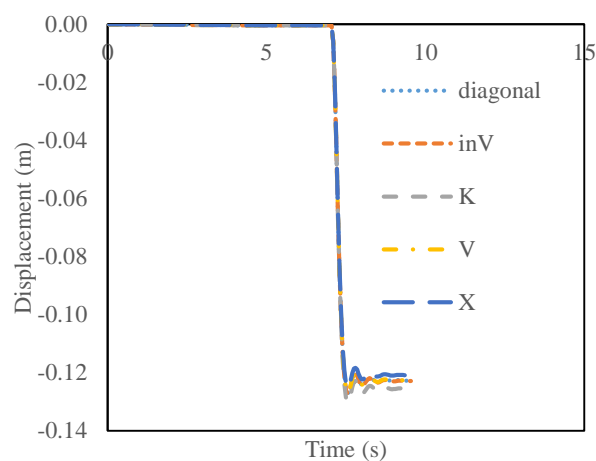
در بخش قبلی تحقیق ظرفیت سازه‌های فولادی دارای مهاربندهای مختلف در دو سناریوی حذف ستون مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی وقوع یا عدم وقوع خرابی پیشرونده در این تحقیق از تحلیل دینامیکی غیر خطی استفاده شده است. سازه‌های فولادی با سیستم‌های مهاربندی مختلف بر اساس استاندارد GSA و روش مسیر بار جایگزین در سناریوی حذف ناگهانی ستون به صورت دینامیکی تحلیل شده و جابجایی قائم نقطه آسیب‌دیده بر اساس زمان به عنوان منحنی پاسخ دینامیکی ارائه شده است. در شکل ۸ و ۹ منحنی پاسخ دینامیکی سیستم‌های سازه‌ای مختلف نشان داده شده است.

شکل ۸- الف منحنی پاسخ دینامیکی سازه‌های ده طبقه دارای مهاربند هم‌محور را نشان می‌دهد بر اساس این شکل جابجایی قائم نقطه آسیب دیده در تمامی سیستم‌های سازه‌ای دارای مهاربند هم‌محور بسیار زیاد و در حدود ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. این مقدار جابجایی نشان می‌دهد سازه در اثر حذف ناگهانی ستون گوشه خسارت زیادی می‌بیند اما پایداری خود را حفظ خواهد کرد. در واقع حذف ناگهانی ستون گوشه باعث شده است پاسخ سازه زیاد شود اما این پاسخ زیاد مانع از ایجاد تعادل مجدد نشده است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت در قاب‌های دو بعدی در صورتی که خرابی موضعی در گوشه سازه اتفاق افتد سازه‌ها دارای پتانسیل خرابی پیشرونده می‌باشند. بررسی شکل ۸- ب نشان می‌دهد در همین سازه‌ها اگر خرابی موضعی در دهانه میانی اتفاق افتد پاسخ سازه به مراتب کمتر از حالت خرابی ستون گوشه خواهد بود. همچنین منحنی‌های پاسخ دینامیکی نشان می‌دهند که در خرابی‌های موضعی در گوشه سازه که جزو دهانه‌های مهاربندی

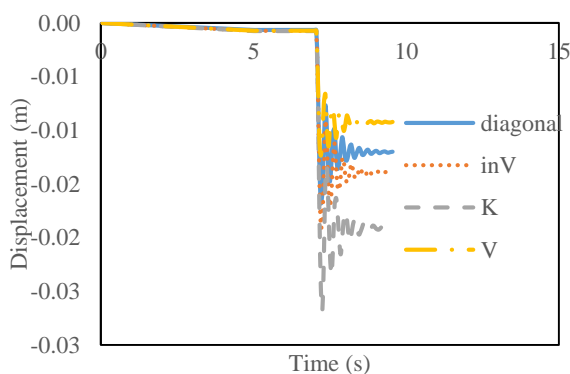
محسوب نمی‌شوند، هم پاسخ سازه (جابجایی در منحنی غیرخطی دینامیکی) و هم ظرفیت (ظریب بار در منحنی غیرخطی استاتیکی) بیشتر از حالت خرابی موضعی در دهانه‌های میانی است. اما در صورتی که خرابی موضعی در دهانه‌های مهاربندی میانی اتفاق افتد، سیستم سازه‌ای در میزان پاسخ سازه نقش خواهد داشت. براساس شکل ۸ و ۹ پاسخ سازه در حالت‌های خرابی موضعی در دهانه‌های میانی در سازه دارای مهاربند زانویی بیشتر از سایر سیستم‌های سازه‌ای می‌باشد. همچنین در تمامی مدل‌های مهاربند هم‌محور، سیستم سازه‌ای دارای مهاربند هفتی و ضربدری دارای کمترین پاسخ و در سیستم‌های سازه‌ای دارای مهاربند واگرا، مهاربند هفتی کمترین پاسخ را داشته است.



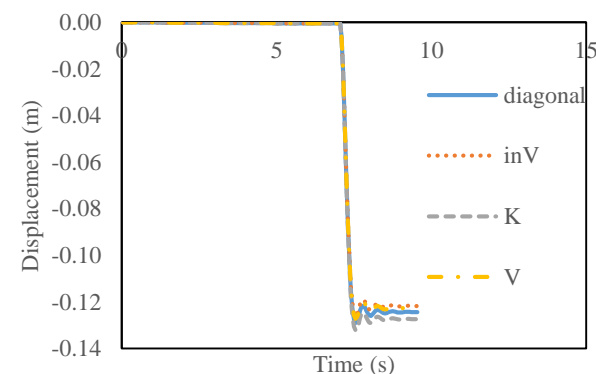
ب) ۱۰ طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون میانی



الف) ۱۰ طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون گوشه

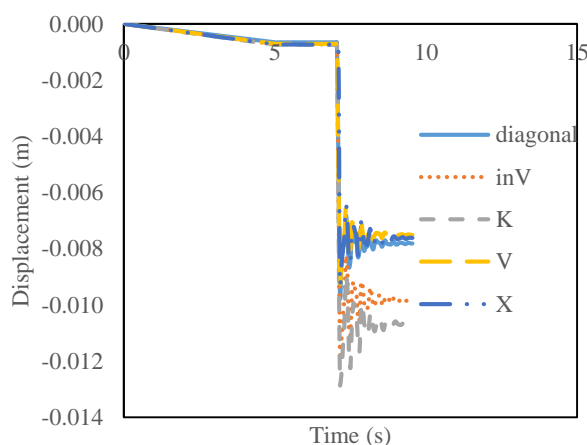


د) ۱۰ طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون میانی

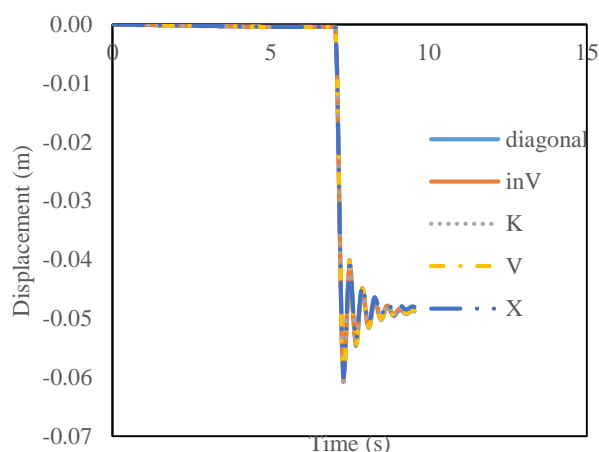


ج) ۱۰ طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون گوشه

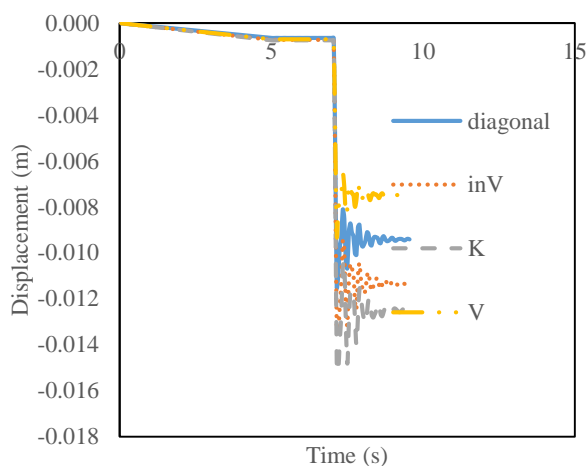
شکل ۸: منحنی پاسخ دینامیکی سازه‌های ده طبقه دارای مهاربندی همگرا و واگرا



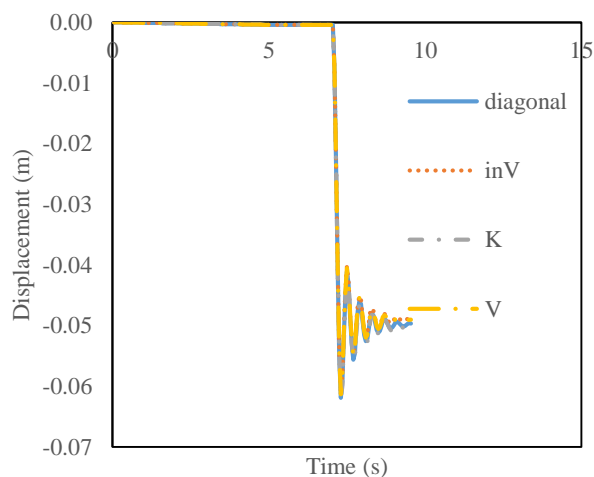
ب) ۲۰ طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون میانی



الف) ۲۰ طبقه مهاربند همگرا، حذف ستون گوشه



د) ۲۰ طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون میانی

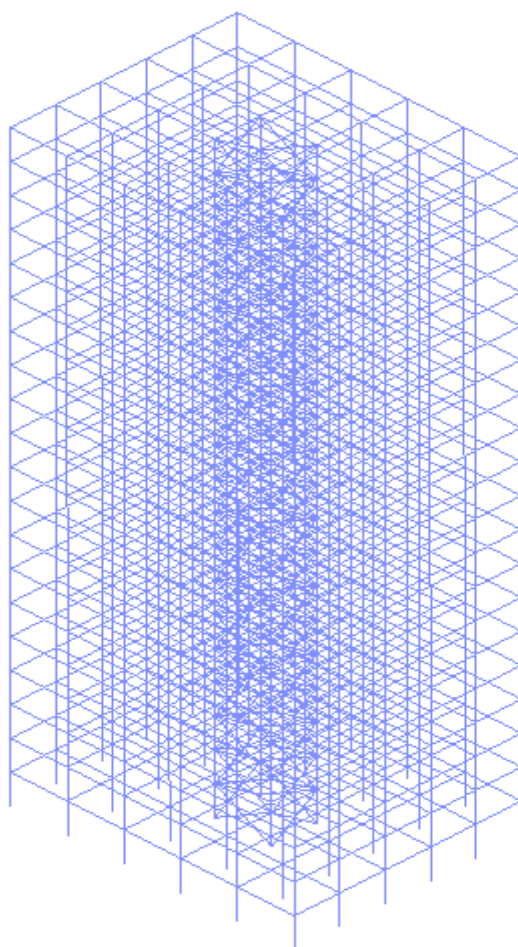


ج) ۲۰ طبقه مهاربند واگرا، حذف ستون گوشه

شکل ۹: منحنی پاسخ دینامیکی سازه‌های بیست طبقه دارای مهاربندی همگرا و واگرا

۴-۳- بررسی یک مدل سه بعدی

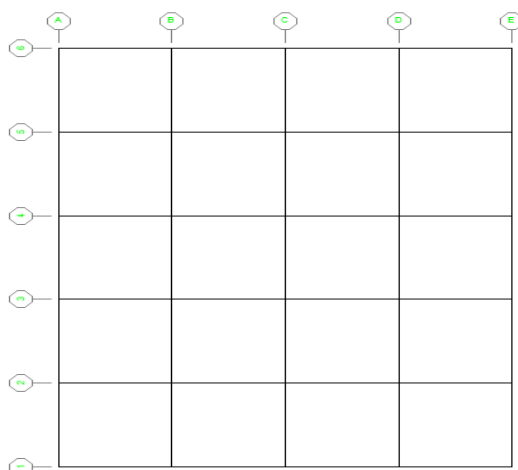
در قسمت‌های قبل تحقیق به منظور بررسی و مقایسه رفتار سازه‌های فولادی مهاربندی شده، مدل‌های دو بعدی به صورت استاتیکی و دینامیکی بررسی شده است، که در میان آنها مهاربندهای هفتی و ضربدری بهترین عملکرد را در برابر خرابی پیشرونده داشتند. لازم به ذکر است تمامی تحلیل‌های انجام گرفته در قسمت‌های قبلی بصورت دو بعدی انجام گرفته‌اند لذا به منظور انجام تحلیل دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت، در این بخش ساختمانی با مهاربند ضربدری که در قسمت قبل دارای بهترین عملکرد بود بصورت استاتیکی و دینامیکی سه بعدی مورد تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۱۰ مدل سه بعدی در نرم افزار Opensees نشان داده شده است.



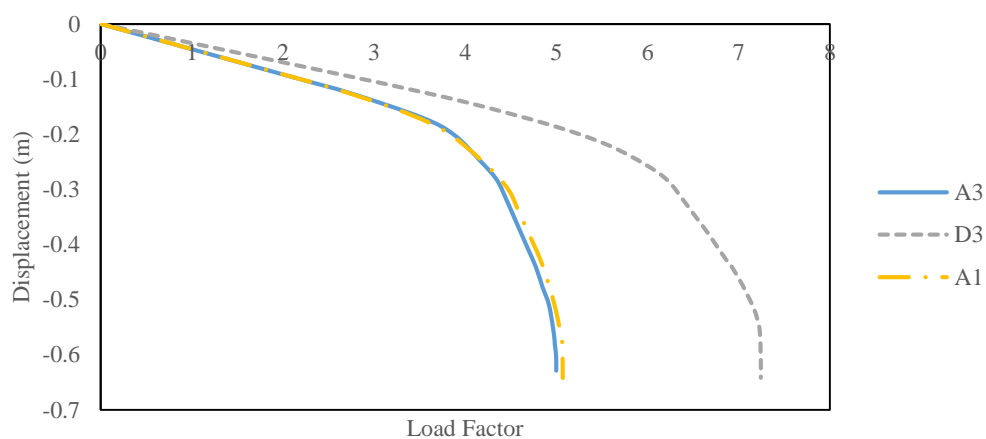
شکل ۱۰: مدل سه بعدی سازه ۲۰ طبقه دارای مهاربند هم محور X

در این مدل سه بعدی سه حالت خرابی موضعی در نظر گرفته شده است. در حالت اول خرابی موضعی یکی از ستون‌های گوشه (A1) حالت دوم ستون میانی یکی از دهانه‌های محیطی (A3) و یکی از ستون‌های دهانه‌های مهاربندی (D3) به عنوان خرابی موضعی در شکل ۱۱ در نظر گرفته شده است. برای هر یک از حالت‌های خرابی موضعی دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی انجام شده است. در شکل ۱۲ منحنی‌های غیرخطی دینامیکی و استاتیکی برای هر حالت خرابی نشان داده شده است.

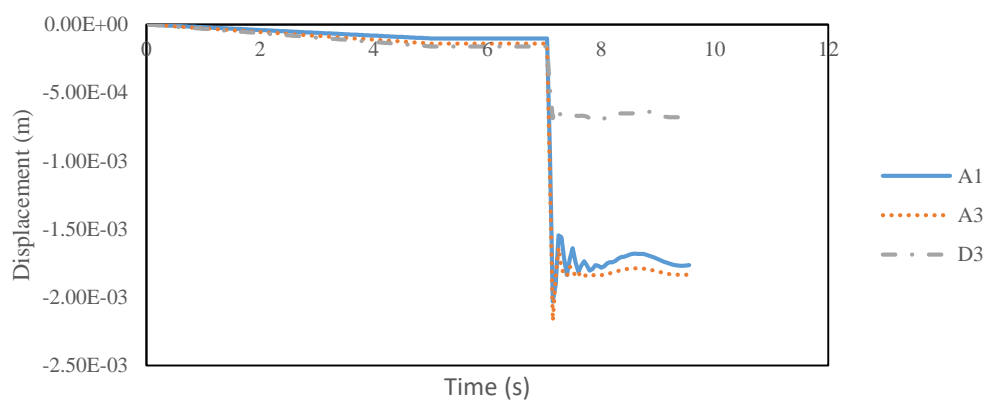
بررسی رفتار سازه سه بعدی نشان می‌دهد در مدل‌های سه بعدی ضریب بار (ظرفیت سازه) و پاسخ دینامیکی (جابجایی قائم) سازه نسبت به سازه‌های دو بعدی به ترتیب بیشتر و کمتر شده است که نشان می‌دهد مدل‌های دو بعدی حالت بحرانی‌تری از خرابی پیشرونده را گزارش می‌دهند. در واقع در مدل‌های سه بعدی به علت وجود تعداد المان‌های بیشتر سازه دارای مسیرهای بار جایگزین بیشتری نسبت به مدل دو بعدی است. وجود المان‌های بیشتر باعث می‌شود ظرفیت تحمل سازه در اثر اعمال اضافه بار ناشی از حذف ستون افزایش یابد و همین افزایش ظرفیت پاسخ دینامیکی سازه را نیز کاهش می‌دهد که در کل باعث کم شدن پتانسیل خرابی پیشرونده در سازه خواهد شد. چراکه سازه در اثر حذف ناگهانی ستون (تحلیل غیرخطی دینامیکی) دارای تغییر شکل‌هایی در حد چند میلیمتر می‌باشد.



شکل ۱۱: سناریوهای حذف ستون های A1, A3 و D3



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: الف) منحنی غیر خطی استاتیکی سازه ۲۰ طبقه سه بعدی ب) منحنی غیر خطی دینامیکی سازه ۲۰ طبقه سه بعدی

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از روش مسیر بار جایگزین و تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی رفتار سازه‌های دارای مهاربند هم‌گرا و واگرا با یکدیگر ارزیابی و مقایسه شده‌اند. در ابتدا سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه طراحی و به صورت دو بعدی و غیر خطی در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شده‌اند. سازه‌ها در دو حالت خرابی ستون گوشه و ستون میانی به عنوان حالت‌های خرابی موضعی بررسی شده‌اند. تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی به منظور ارزیابی ظرفیت سازه‌ها و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به عنوان پاسخ سازه‌های در معرض خرابی پیشرونده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نهایت نیز به دلیل تحلیل دقیق‌تر یک سازه به صورت سه بعدی مدل شده و حالت‌های مختلف حذف ستون در آن بررسی شده است. نتایج حاصله به شرح ذیل بوده است:

در مدل‌های دو بعدی حذف ستون گوشه حالت بحرانی‌تری را نسبت به حذف ستون میانی ایجاد کرده است. به عبارت دیگر حذف ستون در دهانه گوشه که غیر مهاربندی است می‌تواند یکی از بحرانی‌ترین حالت‌های سازه در سناریوی خرابی پیشرونده باشد. ظرفیت سازه در مقاومت در برابر خرابی پیشرونده در دهانه‌های میانی نسبت به دهانه کناری بیشتر به سیستم سازه‌ای وابسته بوده است. در واقع پاسخ سازه به حذف ناگهانی ستون در صورتی که ستون از دهانه مهاربندی حذف شده باشد تابع نوع مهاربند بوده است. منحنی‌های غیر خطی نشان داد در سازه‌های دارای مهاربند هم‌محور، سیستم‌های دارای مهاربند هفتی و ضربدری دارای ظرفیت بیشتر و پاسخ کمتری نسبت به حذف ستون بوده‌اند. پاسخ دینامیکی و منحنی‌های تحلیل غیرخطی استاتیکی نشان داد در سازه‌های دارای مهاربند واگرا، مهاربند هفتی بیشترین ظرفیت را داشته است. این مهاربند در تحلیل غیر خطی دینامیکی نیز کمترین پاسخ را داشته است. بررسی و مقایسه مدل‌ها نشان داد پاسخ سازه به حذف ناگهانی ستون در سازه‌های بلند نسبت به سازه‌های کوتاه‌تر کمتر بوده است. به عبارت دیگر هرچه سازه‌ها دارای طبقات بیشتری بودند، پتانسیل خرابی پیشرونده در آن‌ها کاهش یافته بود. نتایج نشان داد بررسی سازه‌ها در سناریوی خرابی پیشرونده به صورت دو بعدی حالت بحرانی‌تری را نسبت به مدل سه بعدی ایجاد کرده بود. بنابراین توصیه می‌شود در بررسی‌ها از مدل‌های سه بعدی استفاده شود. در کل می‌توان نتیجه گرفت سازه‌های دارای مهاربند هم‌گرا و واگرا نسبت به حذف ناگهانی ستون مقاوم هستند اما با این حال عملکرد آنها بر اساس نوع سیستم سازه‌ای متفاوت است و سیستم سازه‌ای مهاربند ضربدری و هفتی عملکرد بهتری را نسبت به سایر هندسه‌ها دارند.

با توجه به تحقیقات انجام شده و تحقیق حاضر که در زمینه خرابی پیشرونده صورت گرفته است نویسنده این مقاله بر خود می‌داند تا پیشنهاداتی را در مورد تحقیقات آتی ارائه دهد. در این تحقیق حذف ناگهانی ستون به عنوان آسیب اولیه در نظر گرفته شده است. آسیب اولیه می‌تواند به صورت یک آسیب جزئی نیز دیده شود و صرفاً به صورت حذف ناگهانی عضو نباشد بنابراین پیشنهاد می‌شود تا اثر مواردی مانند ضربه و کاهش مقاومت اعضا بر پتانسیل خرابی پیشرونده قاب‌های فولادی مورد نظر این تحقیق انجام شود.

مراجع

- [1] Kim, J., Choi, H., Min, K. W. (2011). Use of rotational friction dampers to enhance seismic and progressive collapse resisting capacity of structures. *The structural design of tall and special buildings*, 20(4), 515-537.
- [2] Lu, D. G., Cui, S. S., Song, P. Y., Chen, Z. H. (2012). Robustness assessment for progressive collapse of framed structures using pushdown analysis methods. *International Journal of Reliability and Safety*, 6(1), 15-37.
- [3] GSA, U. (2003). *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*. Washington, DC. : General Services Administration.
- [4] Unified Facilities Criteria, UFC-DoD (2009). *Design of buildings to resist progressive collapse*.
- [5] Saad, A., Said, A., Tian, Y. (2008, August). Overview of progressive collapse analysis and retrofit techniques. In: *The Proceedings of the 5th International Engineering and Construction Conference*.
- [6] Marjanishvili, S., Agnew, E. (2006). Comparison of various procedures for progressive collapse analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 365-374.
- [7] Kim, J., Park, J. H., Lee, T. H. (2011). Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss. *Engineering Structures*, 33(2), 421-432.
- [8] Ellingwood, B. R., Smilowitz, R., Dusenberry, D. O., Duthinh, D., Lew, H. S., Carino, N. J. (2007). *Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings* (No. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)-7396).

- [9] Menchel, K. (2009). *Progressive collapse: comparison of main standards, formulation and validation of new computational procedures*. Universite Libre de Bruxelles, Faculte des Sciences Appliquees, Ph. D. Thesis.
- [10] Kim, J., Kim, T. (2009). Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1), 169-179.
- [11] Marjanishvili, S., Agnew, E. (2006). Comparison of various procedures for progressive collapse analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 365-374.
- [12] Guo, W., Gilsanz, R. (2003, May). Simple nonlinear static analysis procedure for progressive collapse evaluation. In: *Proceedings of blast and progressive collapse symposium. AISC*.
- [13] Tsai, M. H., Lin, B. H. (2008). Investigation of progressive collapse resistance and inelastic response for an earthquake-resistant RC building subjected to column failure. *Engineering structures*, 30(12), 3619-3628.
- [14] Song, B. I., Sezen, H., Giriunas, K. A. (2010). Experimental and analytical assessment on progressive collapse potential of two actual steel frame buildings. In: *Structures Congress 2010*.
- [15] Gerasimidis, S., Baniotopoulos, C. C. (2011). Steel moment frames column loss analysis: The influence of time step size. *Journal of constructional steel research*, 67(4), 557-564.
- [16] McKay, A., Marchand, K., Diaz, M. (2012). Alternate path method in progressive collapse analysis: Variation of dynamic and nonlinear load increase factors. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 17(4), 152-160.
- [17] Tavakoli, H., Afrapoli, M. M. (2018). Robustness analysis of steel structures with various lateral load resisting systems under the seismic progressive collapse. *Engineering Failure Analysis*, 83, 88-101.
- [18] Larijani, R.J, Celicag, M., Kazemi, M. (2013). Progressive collapse analysis of two existing steel buildings using a linear static procedure. *Structural Engineering and Mechanics*, 48(2), 207-220.
- [19] Larijan, R. J., Nasserabadi, H. D., Aghayan, I. (2017). Progressive collapse analysis of buildings with concentric and eccentric braced frames. *Structural Engineering and Mechanics*, 61(6), 755-763.
- [20] Foyuz, A., Hashemi, S Khaledi, M. (2015). Progressive collapse evaluation of concentric bracing steel frames using nonlinear dynamic analysis. *Fourth national conference of new materials and structures in civil engineering* (In Persian).
- [21] Salimi, P., Farimani, A. (2017). Progressive collapse evaluation of steel frames with eccentric bracing systems in number of different floors using push down analysis. *Sixth national conference and second international of new materials and structures in civil engineering* (In Persian).
- [22] Hosseini, S., Ghodrati Amiri, G. (2018). Evaluating the Effect of Stability Control on Progressive Collapse of Structures with EBF Systems. *Building Engineering & Housing Science*, 12(22), 1-12 (In Persian).
- [23] Liu, Z., Zhu, Y. (2019, January). Progressive collapse of steel frame-brace structure under a column-removal scenario. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing.
- [24] Salmasi, A. C., Sheidaii, M. R. (2017). Assessment of eccentrically braced frames strength against progressive collapse. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 543-551.
- [25] Naji, A., Khodaverdi Zadeh, M. (2019). Progressive collapse analysis of steel braced frames. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 24(2), 04019004-1 04019004-9.
- [26] Tavakoli, H. R., Kiakojouri, F. (2014). Progressive collapse of framed structures: Suggestions for robustness assessment. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 21(2), 329-338.