

## Investigation of nonlinear behavior of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel haunch bracing under progressive collapse

Mojgan Taheri<sup>1</sup>, Hossein Parvini Sani<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. graduate, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

### ABSTRACT

Progressive collapse is a nonlinear phenomenon that starts from the damage of a part of the structure and ends with the whole structure and its total damage. Therefore, the study of this phenomenon in high-rise and important structures while securing it will ensure the design process of the structure. Progressive collapse usually occurs in the structure due to the loss of one of the main members of the structure, which is usually the desired column. With the sudden removal of a column in the structure, in the node where the column is removed from the structure, there is a displacement that has a seismic nature. In this research, the effect of using steel haunch bracing with different locations in concrete moment frames is investigated under progressive collapse. The purpose of this evaluation was to determine the vulnerability of concrete structures retrofitted with steel haunch bracing as well as the effect of steel haunch bracing in spans and height of the structure, the place of eliminated element (edge or middle) and the number of the story in which the member was removed in the progressive collapse, is studied. A noteworthy point in different cases of component removal is in the wide changes of stresses and change of node displacement and lack of formation of plastic hinges in the members, which can be explained by the proper distribution and placement of steel haunch bracing in spans and height of the structure in the place of elimination of members in the model, there are more structural elements and this issue strengthens the catenary action of the members to transport and transfer load and also the immediate stabilization of the situation.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 16 August 2020

**Revise Date:** 30 December 2020

**Accept Date:** 19 January 2021

### Keywords:

Nonlinear behavior  
Progressive collapse  
Steel haunch bracing  
Reinforced concrete moment frames  
Retrofitting

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.244088.2218>

\*Corresponding author: Hossein Parvini Sani  
Email address: [hossein.parvini\\_sani@iauz.ac.ir](mailto:hossein.parvini_sani@iauz.ac.ir)

## بررسی رفتار غیر خطی قاب‌های خمشی بتنی تقویت شده با دستک فلزی در خرابی

### پیش‌رونده

مژگان طاهری<sup>۱</sup>، حسین پروینی ثانی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

### چکیده

تخریب پیش‌رونده یک پدیده غیرخطی است که از آسیب دیدگی قسمتی از سازه شروع شده و به کل سازه و تخریب کلی آن ختم می‌شود. لذا بررسی این پدیده در سازه‌های بلند مرتبه و با اهمیت زیاد، ضمن ایمن کردن آن باعث اطمینان از طراحی سازه خواهد شد. تخریب پیش‌رونده معمولاً در سازه به دلیل از بین رفتن یکی از عضوهای اصلی سازه که معمولاً ستون مورد نظر می‌باشد صورت می‌گیرد. با حذف ناگهانی یک ستون در سازه، در گره‌ای که ستون حذف شده است، تغییر مکانی که ماهیت پیش‌رونده دارد به وجود می‌آید. در این پژوهش تأثیر به کارگیری دستک های فلزی در دهانه‌ها با جانمایی مختلف در قاب خمشی بتنی در خرابی پیش‌رونده مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این ارزیابی این بوده که در مرحله اول میزان آسیب‌پذیری سازه‌های بتنی قاب خمشی تقویت شده با دستک در خرابی پیش‌رونده و همچنین تأثیر دستک در دهانه‌ها و ارتفاع سازه، محل عضو حذف‌شده (کناری یا میانی) و شماره طبقه‌ای که عضو در آن حذف‌شده، در برابر پدیده خرابی پیش‌رونده بررسی شود. نکته قابل توجه در حالت‌های مختلف حذف اجزا، در تغییرات گسترده تلاش‌ها و تغییر مکان‌های گرهی و عدم تشکیل مفاصل پلاستیک و کاهش درصد احتمال خرابی در اعضا می‌باشد که می‌توان دلیل آن را به این صورت بیان کرد که با توزیع و جانمایی مناسب دستک‌ها در دهانه‌ها و ارتفاع سازه، در محل حذف اعضا در این مدل، المان‌های سازه‌ای بیشتری وجود داشته و این موضوع موجب تقویت کنش زنجیره‌ای اعضا جهت حمل و انتقال بار و همچنین تثبیت فوری وضعیت به وجود آمده می‌گردد.

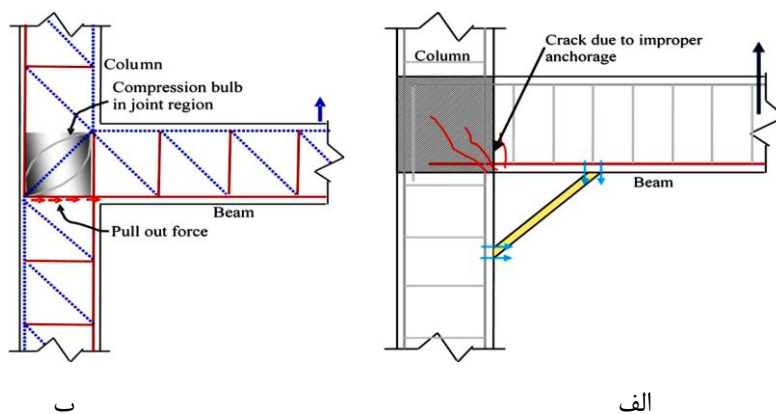
کلمات کلیدی: رفتار غیر خطی، خرابی پیش‌رونده، دستک فلزی، قاب های خمشی بتنی، مقاوم سازی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.244088.2218	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.244088.2218	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۱۰	۱۳۹۹/۰۵/۲۶
حسین پروینی ثانی hossein.parvini_sani@iauz.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

واژه خرابی پیش رونده در سازه‌های مهندسی به فرآیندی گفته می‌شود که در آن خرابی به صورت موضعی آغاز شده و به صورت حرکت زنجیره‌ای موجب خرابی ناقص و یا کلی ساختمان می‌شود [۱]. پدیده خرابی پیش‌رونده در اکثر نقاط جهان یک پدیده نادر می‌باشد، با این وجود می‌تواند نتایج بسیار ناگواری از خود بجای بگذارد. با توجه به افزایش حملات تروریستی به ساختمان‌های مهم در سال‌های اخیر، مطالعه و بررسی دقیق‌تر این بحث ضروری به نظر می‌رسد. در بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده باید ابتدا عامل بارگذاری غیرعادی و خرابی‌های جزئی ناشی از آن بررسی گردد و پس از آن با توجه به خرابی‌های پدید آمده، برخی از توانایی‌ها سازه از جمله پیوستگی، شکل پذیری و درجه نامعینی سازه برای جلوگیری از گسترش خرابی، مورد بررسی قرار گیرد. خرابی پیش‌رونده را می‌توان به عنوان واکنش زنجیره‌ای تعریف کرد که از یک یا چند عضو در سازه شروع شده و منجر به خرابی تمام و یا دست کم بخشی از سازه می‌گردد [۲]. از جمله‌ی این خرابی‌ها می‌توان به تخریب ساختمان‌های رونان پوینت، آلفرد مورا، و مرکز تجارت جهانی اشاره نمود که موجب بررسی جامع‌تر این موضوع از سوی مهندسين سازه و سرآغاز تحقیقات متعددی در این زمینه شد [۳-۵]. در مطالعات انجام شده پیشین تاکید شده است که به کارگیری جزئیات مناسب، استفاده از طول مهاري کافی در سازه‌های بتنی، مقاوم سازی و تقویت اجزای ضعیف، ایجاد پیوستگی مناسب در سازه‌ها، تامین شکل پذیری کافی به منظور افزایش ظرفیت باز توزیع لنگر و ایجاد نامعینی کافی همگی از عوامل موثر جهت کاهش و کنترل خرابی در برابر خرابی پیش‌رونده محسوب می‌شوند [۶-۹].

یکی از روش‌هایی را که در مقاوم سازی قاب‌های بتن آرمه برای بهبود رفتار موضعی و کلی قاب بویژه زمانی که تیر بتنی از نظر تغییر مکان قائم تحت بار ثقلی یا تغییر مکان جانبی قاب تحت بار جانبی دچار مشکل باشد می‌توان پیشنهاد کرد، استفاده از دستک و طوقه فلزی است. پیمپانین و همکاران [۱۰] این ایده ابتکارانه را در سال ۲۰۰۶ پیشنهاد دادند و با قراردادن دستک فلزی در بالا و پایین اتصال به این نتیجه دست یافتند که تقاضای خمشی در تیرها و ستون‌های اطراف گره تقویت شده با دستک، بدلیل عملکرد میله‌ای این دستک‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که با تغییر زاویه، مصالح و سختی محوری دستک‌ها می‌توان عملکرد مطلوب‌تری را انتظار داشت. البگهاسن و همکاران [۱۱] نیز در سال ۲۰۰۸ با انجام تست آزمایشگاهی تحت بار چرخه‌ای بهبود عملکرد قاب‌های بتنی تقویت شده با دستک را تایید نمودند. شربتدار و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۲ با انجام کار آزمایشگاهی، کارآمدی این روش را در بهسازی اتصالات تیر-ستون بتن آرمه آسیب دیده و ندیده تحت بارهای چرخه‌ای نشان دادند. نتایج آن‌ها حاکی از این دستاورد بود که وجود طوقه‌های فلزی با اتصالات پیچی اصطکاکی موجب تماس کامل طوقه‌های فلزی با سطح بتن شده و از سر خوردگی طوقه‌ها و تمرکز تنش در محل اتصال با سطح بتن جلوگیری می‌کند. فنگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ با انجام تست آزمایشگاهی و تحلیلی، نشان دادند که با استفاده از آرماتور خمیده در تیر بتنی عملکرد لرزه‌ای و مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده بهبود می‌یابد. ساسمال و ووگو [۱۴] در سال ۲۰۱۸ با انجام تست آزمایشگاهی نشان دادند که استفاده از تک دستک (شکل ۱) موجب کاهش دررفت تا مقدار ۲۰٪ و افزایش ۴۶٪ در اتلاف انرژی می‌شود و در نهایت برای مکانیزم نیرو و مسیر بار تشکیل شده روابط تحلیلی ارائه دادند.



شکل ۱: الف) تشکیل حباب فشاری در چشمه اتصال و نیروهای برکنش، ب) خرابی ناگهانی در اتصال تقویت شده با دستک [۱۴]

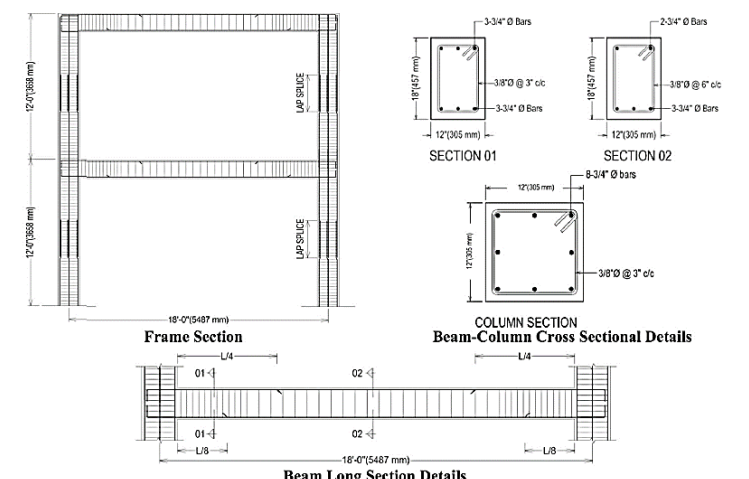
رضازاده و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ با افزودن دستک قطری در دو حالت ضعیف و قوی به قاب خمشی فولادی نشان دادند که در این قاب خمشی‌های خمشی فولادی محل مفصل پلاستیک تغییر کرده و قاب دارای سختی و عملکرد مناسب‌تری در برابر خرابی پیش رونده می‌باشد. زهرایی و عزالدین [۱۶] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تاثیر افزودن کمر بند خرابی در سازه ۵ و ۱۰ طبقه بتنی در خرابی پیش رونده پرداختند. نتیجه مطالعات آنان نشان داد که تقویت سازه بتنی با کمر بند خرابی بدلیل امکان انتقال نیروی محوری از مسیر ستون‌های مجاور در اثر حذف ستون موجب تاخیر در خرابی موضعی و خرابی پیش رونده می‌شود. احمد و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۹ با انجام تست میز لرزه برای یک ساختمان دو طبقه بتنی تقویت شده با دستک فلزی با مقیاس ۱/۳ و مدلسازی عددی و انجام تحلیل دینامیکی فزاینده، ریسک لرزه‌ای و هزینه‌های سالانه کاهش یافته احتمالاتی را بررسی نمودند.

تاثیر تقویت سازه‌های بتنی با دستک فلزی تحت بارهای لرزه‌ای در مطالعات پیشین انجام شده است. استفاده از این دستک‌ها به دلیل سهولت اجرایی می‌تواند یکی از راهکارهای پیشنهادی جهت مقاوم سازی سازه‌های بتنی در برابر خرابی پیش رونده باشد. اتصال گیردار و مفصلی دستک فلزی می‌تواند در مقدار سختی جانبی قاب‌های بتنی تاثیرات چشمگیری داشته باشد. از اینرو تغییرات در سختی جانبی قاب‌های خمشی بتنی می‌تواند در رفتار خرابی پیش رونده سازه‌های بتنی نقش بسزایی داشته باشد. با این وجود، بر خلاف مطالعات بسیار در موضوع تاثیر این دستک‌ها در سازه‌های فولادی در برابر خرابی پیش رونده، پژوهش متمرکز در ارتباط با تاثیر این دستک‌ها در سازه‌های بتنی در برابر این نوع خرابی انجام نشده است. در این پژوهش هدف بررسی تاثیر این دستک‌ها در قاب‌های خمشی بتنی در برابر خرابی پیش رونده می‌باشد. در این مطالعه تاثیر دستک فلزی بر کاهش یا افزایش درصد احتمال خرابی قاب‌های خمشی بتنی در برابر خرابی پیش‌رونده بررسی شده و سعی شده است که با جابجائی دستک‌ها و چیدمان آن‌ها درصد احتمال خرابی کاهش یابد.

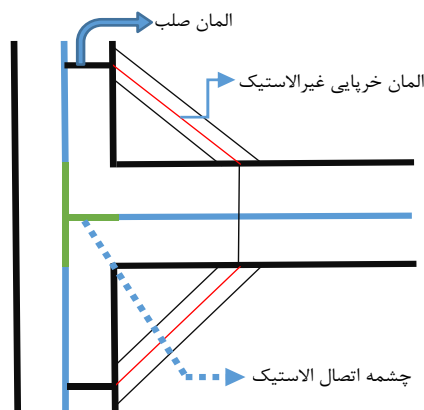
## ۲- مدلسازی

### ۲-۱- صحت سنجی

با توجه به عدم وجود تست دقیق آزمایشگاهی در زمینه خرابی پیش رونده با مشخصات مطالعه حاضر، می‌توان جهت بررسی صحت سنجی نرم افزار، مدلسازی و کنترل تحت شتابنگاشت لرزه‌ای را انجام داد چرا که بحث اصلی در این زمینه اطمینان از صحت تعریف رفتار غیرخطی و مفاصل پلاستیک است که عیناً در خرابی پیش رونده نیز به کار می‌رود. باید توجه نمود که ماهیت رفتاری زلزله با خرابی پیش‌رونده تفاوت می‌کند چرا که خرابی پیش‌رونده یک خرابی قائم و ناگهانی و ادامه دار و با سازوکار حذف ستون در طبقات می‌باشد اما زلزله یک خرابی غالباً افقی است (خصوصاً در زلزله های دور از گسل)، بنابراین هدف از صحت سنجی در این قسمت فقط اطمینان از صحت مدل قاب و دستک بوده است. به منظور صحت سنجی نرم افزار مورد استفاده در این پژوهش، از مطالعه احمد و همکاران [۱۷] استفاده شده است. در این راستا قاب ۲-بعدی معادل (شکل ۲) در نظر گرفته شده در پژوهش احمد و همکاران (مدل DH2) در نرم افزار SAP2000 Ver:16.2.2 [۱۸] مدلسازی شده و پس از تقویت با دستک، تحت شتاب نگاشت زلزله ۱۹۹۴ نورث ریج قرار گرفته است. در نرم افزار مفاصل پلاستیک خمشی و برشی به صورت متمرکز معرفی شده و دستک نیز به صورت المان محوری غیرالاستیک به تیر و متصل شده است [۱۷]. نحوه مدلسازی دستک و چشمه اتصال در شکل ۳ نمایش داده شده است. به منظور مدلسازی چشمه اتصال در نرم افزار فوق از رفتار الاستیک بر اساس مقاطع ستون‌ها استفاده شده است.

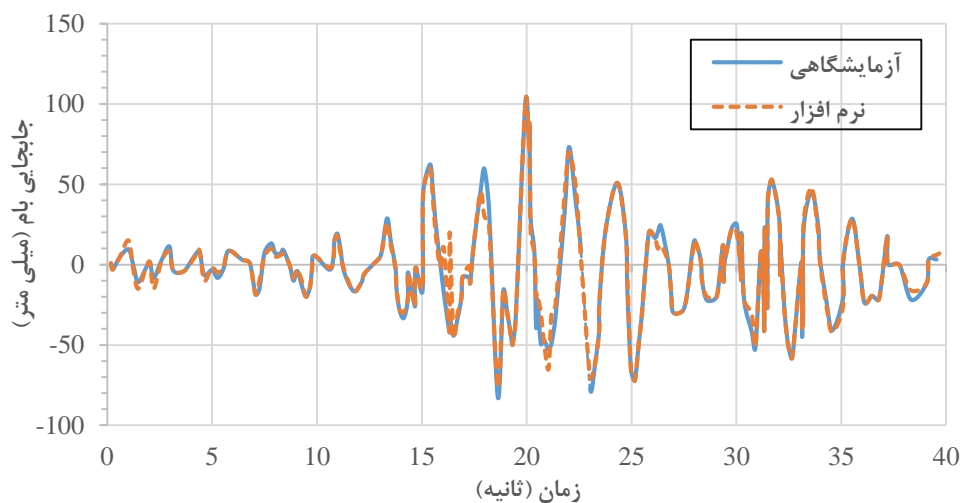


شکل ۲: قاب خمشی بتنی جهت صحت سنجی [۱۷]



شکل ۳: نحوه مدل‌سازی دستک و چشمه اتصال در قاب خمشی بتنی جهت صحت سنجی [۱۷]

نمودار جابجایی بام- زمان برای شتاب نگاشت تعریف شده در نرم افزار و مدل آزمایشگاهی در شکل ۴ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان خطای مدل‌سازی در نرم افزار SAP2000 Ver:16.2.2 نسبت به نتایج آزمایشگاهی ناچیز بوده و مدل‌سازی رفتار غیر خطی به درستی انجام شده است.



شکل ۴: نمودار تغییر مکان بام- زمان برای شتاب نگاشت تعریف شده در نرم افزار و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

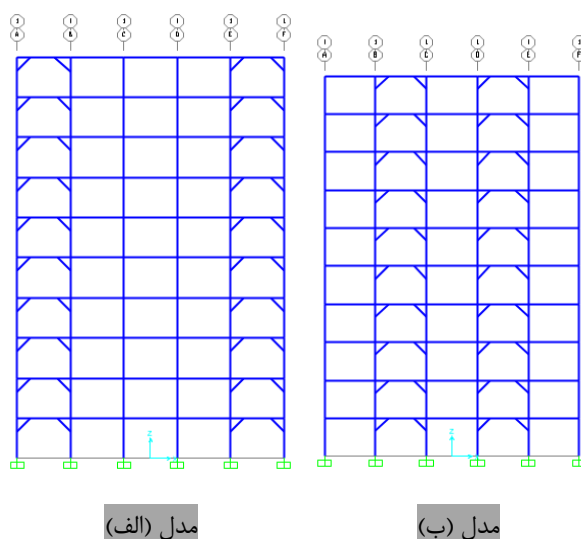
## ۲-۲- کلیات مدلسازی و تعریف خواص مواد

در این تحقیق برای بارگذاری از مبحث ششم مقررات ملی (بارهای وارد بر ساختمان) [۱۹]، برای طراحی سازه از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۲۰]، برای ملاحظات لرزه‌ای از استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۲۱]، برای تعیین مشخصات مفاصل پلاستیک از آیین‌نامه FEMA356 [۲۲] و در نهایت برای بحث خرابی پیش‌رونده از آیین‌نامه UFC (UFC۲۰۰۹) [۲۳] استفاده شده است. همچنین برای تحلیل مدل‌های مورد نظر نرم‌افزار SAP2000 Ver:16.2.2 به کار گرفته شده است.

به منظور بررسی خرابی پیش‌رونده ساختمان ۱۰ طبقه بتنی قاب خمشی با شکل پذیری متوسط طراحی گردید. ساختمان مذکور ساختمانی با پلان مربعی با زیربنای ۶۲۵ مترمربع با ۵ دهانه در هر ضلع می‌باشد. ارتفاع طبقات یکسان و برابر ۳ متر و فاصله محور به محور ستون‌ها نیز ۵ متر لحاظ گردیده است. سازه در منطقه با لرزه‌خیزی شدید، نوع خاک III و کاربری سازه مسکونی در نظر گرفته شده است. این ساختمان ۱۰ طبقه در پنج مدل متفاوت از نظر جانمایی دهانه‌های که از دستک استفاده شده است و همچنین تغییر جانمایی دستک در ارتفاع قاب، برای بررسی اثر این تغییرات در خرابی پیش‌رونده طراحی شده است. در شکل ۵ تمامی پنج مدل طراحی شده نشان داده شده است. این مدل‌ها از نظر تعداد و فاصله بین دهانه‌ها و ارتفاع طبقات در قاب مشابه هستند. بتن مصرفی از رده C25 و آرماتور مصرفی نیز AIII فرض شده است. جدول ۱ مقاطع تیرها و ستون‌ها را نمایش می‌دهد.

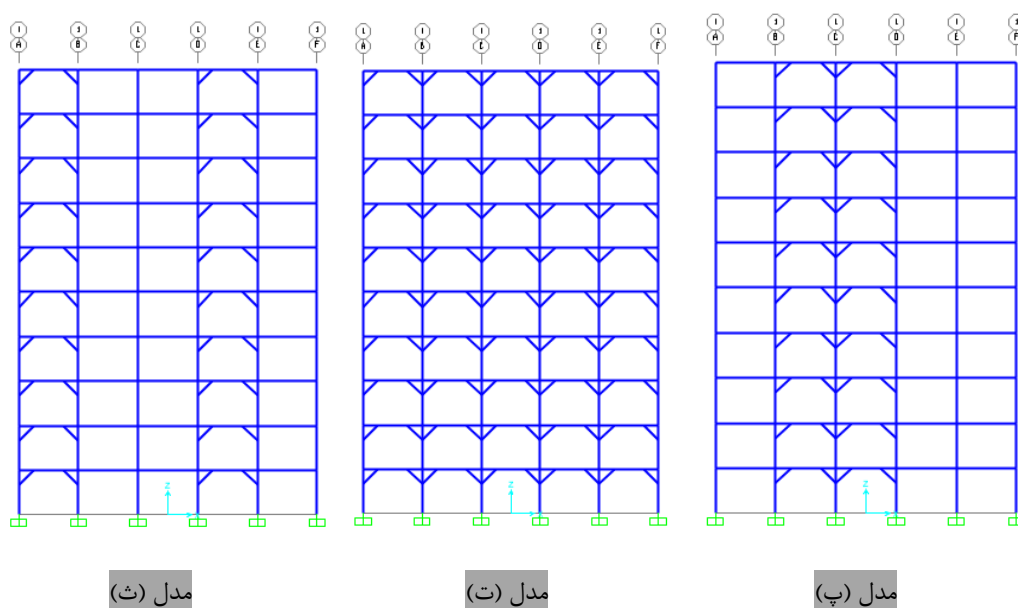
جدول ۱: مشخصات مقاطع تیرها و ستون‌ها

ستون‌ها (CmXCm)	تیرها (CmXCm)	طبقات
65X65	65X65	طبقه اول تا سوم
60X60	60X60	طبقه چهارم تا ششم
55X55	55X55	طبقه هفتم و هشتم
50X50	50X50	طبقه نهم و دهم



مدل (الف)

مدل (ب)

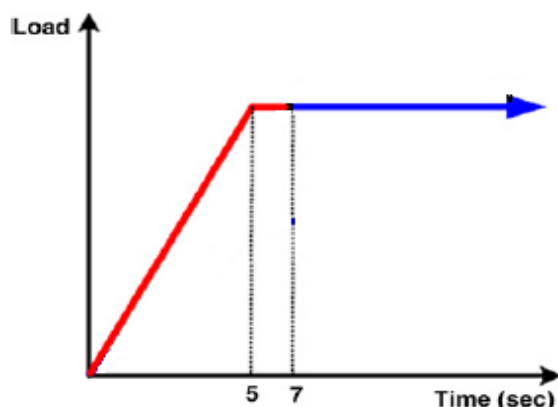


شکل ۵: قاب خمشی بتنی با دستک ایجاد شده در نرم افزار SAP2000 جهت تحلیل دینامیکی

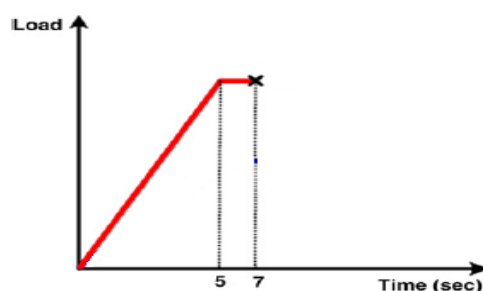
### ۲-۳- روند بارگذاری در تحلیل دینامیکی غیرخطی

در تحلیل دینامیکی غیرخطی در هر حالت حذف عضو، به این صورت عمل می‌شود که در اولین گام ترکیب بار ثقلی و جانبی مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی به صورت استاتیکی به سازه آسیب‌نندیده وارد می‌گردد و نیروهای انتهایی عضو که قرار است حذف گردد، مشخص می‌شود. در گام بعدی ترکیب بار ثقلی و جانبی و همچنین نیروهای عضو حذف‌شده که در گام قبل خوانده شده است به صورت استاتیکی روی سازه آسیب‌دیده گذاشته می‌شوند. البته لازم به ذکر است که نیروهای عضو حذف‌شده، در جهت عکس به سازه اعمال می‌گردد. پس از چند ثانیه که سازه به حالت تعادل استاتیکی رسید، نیروهای شبیه‌ساز وجود عضو که روی سازه قرار داشتند به صورت ناگهانی حذف گردیده تا تأثیر دینامیکی ایجاد شده با برداشتن ناگهانی عضو، شبیه‌سازی گردد [۲۳].

نحوه اعمال بارهای ثقلی و جانبی و همچنین مدل اعمال و حذف بار عضو با استفاده از تعریف یک تاریخچه بارگذاری مطابق شکل‌های ۶ و ۷ به نرم‌افزار معرفی می‌گردند [۲۳].



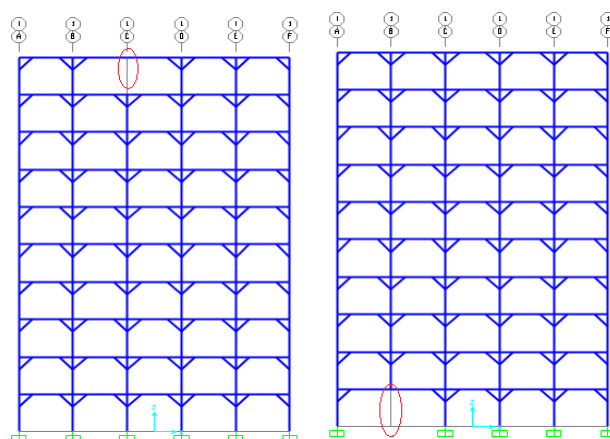
شکل ۶: نحوه اعمال بارهای ثقلی و جانبی در تحلیل دینامیکی غیرخطی [۲۳]



شکل ۷: نحوه اعمال و حذف بار عضو در تحلیل دینامیکی غیرخطی [۲۳]

## ۲-۴- حالت‌های حذف عضو

در همه مدل‌های مورد مطالعه در این تحقیق، با توجه به ۵ دهانه بودن قاب‌ها و با در نظر گرفتن تقارن، در سه طبقه: اول، ششم و دهم و در هر یک از این طبقات، چهار سناریو حذف ناگهانی عضو بررسی شده است. در تمامی مدل‌ها حذف ستون گوشه، حذف ستون میانی، حذف جفت دستک و حذف یک ستون و دستک متصل به آن، چهار سناریو حذف عضو در هر یک از طبقات نامبرده شده را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق اثر خرابی پیش‌رونده روی پنج مدل مختلف بررسی شده است و نتایج باهم مقایسه خواهند شد. لازم به ذکر است محل ستون‌های مورد حذف با توجه به بخش 9.2-3 از آیین‌نامه UFC، انتخاب شده است. در ضمن با توجه به جابجایی دستک‌ها در ۵ مدل پیشنهادی سعی شده است سناریوها در هر قاب بگونه‌ای انتخاب شود که ضمن حذف ستون مورد نظر، دستک‌ها نیز قابلیت حذف داشته باشد و نحوه انتخاب سناریوها با چندین مرحله سعی و خطا بوده که در هر قاب بیشترین و بحرانی‌ترین تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شود. برای قابل شناسایی بودن اعضای حذف‌شده و محل آن‌ها در موارد تحلیل روش‌های مسیر فرعی انتقال بار در مدل‌های مورد مطالعه، باید به هر حالت حذف، نام‌گذاری مناسبی اختصاص داده شود. در این پژوهش نام‌گذاری اعضا با توجه به آکس محوری ستون نشان داده شده در شکل مربوط به هر کدام از مدل‌ها و طبقه قاب مورد مطالعه می‌باشد. به عنوان مثال مدل الف را در نظر بگیرید، حالتی که سناریو حذف ستون میانی (ستون C) در طبقه دهم این مدل مدنظر باشد، به صورت حالت حذف «ستون C-10» نام‌گذاری شده است. این حالت حذف در شکل (الف-۸) نشان داده شده است و یا سناریو حذف «ستون و دستک B-1» همان‌طور که در شکل (الف-۸) مشاهده می‌کنید، مربوط به حالتی می‌باشد که در آن ستون B به همراه دستک متصل به آن در طبقه اول، با هم از مدل حذف می‌شوند. حالت «دستک‌های B-6 و C-6» به معنی حذف دستک متصل به ستون B و حذف دستک متصل به ستون C در طبقه ششم به طور همزمان از مدل مورد نظر می‌باشد.



شکل ۸: نحوه سازوکار حذف ستون در قاب (ب) حالت حذف ستون و دستک B-1 (الف) حالت حذف ستون و دستک‌های C-10

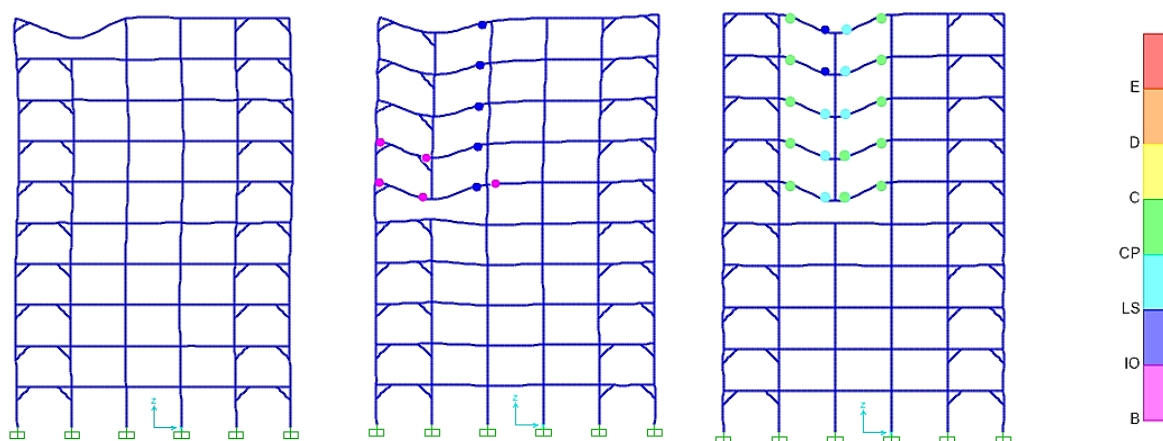
شکل ۸: نحوه سازوکار حذف ستون در قاب



## ۳- نتایج تحلیل

## ۳-۱- نتایج تحلیل دینامیکی مدل نمونه الف

این مدل با حذف اجزا در سه طبقه اول، ششم، دهم و در هر یک از این طبقات، چهار حالت جداگانه حذف عضو بررسی شده است. در شکل ۹ مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل "الف" در سه حالت حذف عضو مشاهده می‌گردد.



ج) سطح عملکرد غیرمجاز مفاصل پلاستیک (ب) سطح عملکرد مجاز مفاصل پلاستیک (الف) عدم تشکیل مفاصل پلاستیک

شکل ۹: مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل "الف" در سه حالت حذف اجزا

بر اساس آیین‌نامه UFC سطح عملکرد مجاز برای چرخش مفاصل پلاستیک در تیرها، آستانه فروریزش و برای ستون‌ها ایمنی جانی می‌باشد. اگر میزان چرخش مفاصل پلاستیک در هر یک از اعضا و در هر یک از حالات حذف، از این مقادیر فراتر برود سازه توانایی مقابله با خرابی پیش‌رونده را ندارد. در حالت حذف ستون C-6 شکل ۹ قسمت (ج)، سطح عملکرد مفصل پلاستیک تشکیل شده در تیر بالای محل حذف ستون از مقدار مجاز آیین‌نامه UFC یعنی آستانه فروریزش، فراتر رفته است و سازه توانایی مقابله با خرابی پیش‌رونده در این حالت حذف را ندارد و فروریزش رخ می‌دهد؛ اما در حالت حذف ستون و دستک B-6 (قسمت (ب) شکل ۹)، کلیه سطح عملکرد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در اعضای قاب در ناحیه مجاز آیین‌نامه UFC قرار گرفته‌اند. در نتیجه سازه در این حالت حذف، توانایی مقابله با خرابی پیش‌رونده را دارد. در حالت حذف ستون و دستک B-10 مطابق با قسمت (الف) شکل ۹ در هیچ‌کدام از اعضای سازه مفصل پلاستیک تشکیل نمی‌شود. به دلیل تعداد زیاد حالات حذف از آوردن شکل مربوط به نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در سایر حالات حذف خودداری می‌شود. در ادامه نتایج مربوط به تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده برای تمام سناریوهای حذف در این مدل، به صورت خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است.

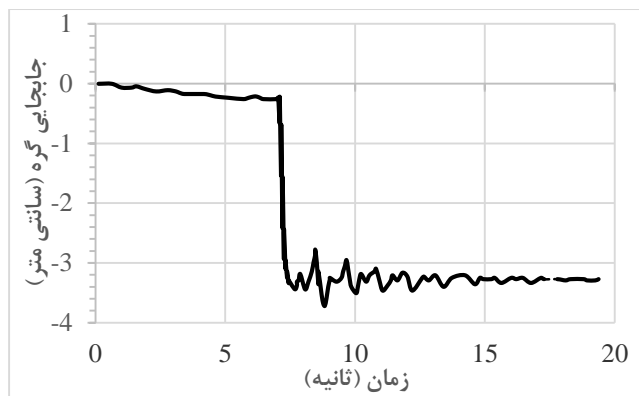
جدول ۲: تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل الف

سطح عملکرد مفاصل پلاستیک و تعداد مفاصل تشکیل شده					حالت حذف
سطح عملکرد غیر مجاز	C >P	LS < CP	IO < LS	<O	
-	-	-	-	-	ستون A-1
۲	۲	۶	۲۸	۹	ستون C-1
-	-	-	-	۱	دستک های A-1 و B-1
-	-	-	۱۴	۶	ستون و دستک B-1
-	-	-	-	-	ستون A-6
۱۳	۱۳	۶	۱	-	ستون C-6
-	-	-	-	-	دستک های A-6 و B-6
-	-	-	۴	۳	ستون و دستک B-6
-	-	-	-	-	ستون A-10
-	-	-	۴	-	ستون C-10
-	-	-	-	-	دستک های A-10 و B-10
-	-	-	-	-	ستون و دستک B-10

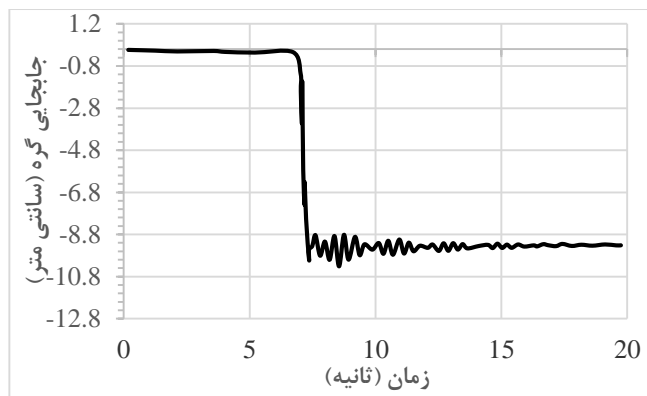
در مدل الف از کل ۱۲ حالت حذف با توجه به جدول ۲، در ۲ حالت حذف چرخش مفاصل پلاستیک از مقادیر مجاز آیین نامه UFC فراتر رفته است و این بدان معناست که در این حالتها، فروریزش رخ می دهد؛ بنابراین احتمال خرابی این سازه (با فرض یکسان بودن احتمال وقوع تمام سناریوها) در مقابل خرابی پیش رونده به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$d = \left(\frac{2}{12}\right) \times 100 = 16.67\%$$

یکی دیگر از پارامترهایی که در بحث خرابی پیش رونده مورد بررسی قرار می گیرد تاریخچه جابجایی گره بالای محل حذف ستون می باشد. به عنوان نمونه در شکل ۱۰ تاریخچه جابجایی گره ها در مدل الف آورده شده است. در تمامی نمودارها قسمت افقی نمودار معرف زمان برحسب ثانیه و قسمت عمودی مربوط به جابجایی بر حسب سانتیمتر می باشد. در ضمن خلاصه نتایج مربوط به جابجایی ماکزیمم گره بالای محل حذف ستون در تمام حالات حذف ستون مربوط به مدل الف در جدول ۳ ارائه شده است.



ب) حالت حذف ستون و دستک B-1: جایجایی ماکزیمم ۳/۷ cm



الف) حالت حذف ستون C-1: جایجایی ماکزیمم ۱۰/۳۱ cm

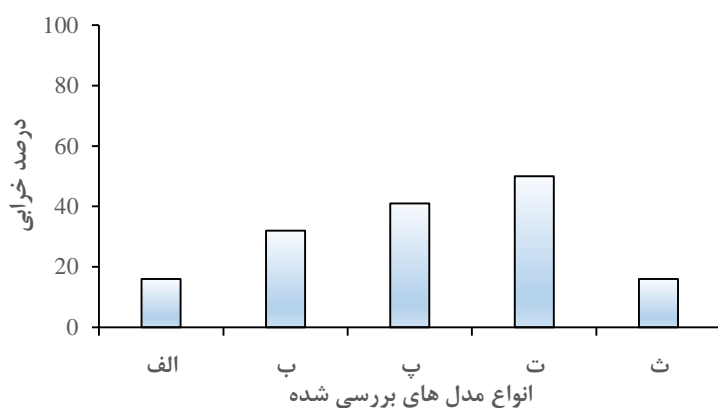
شکل ۱۰: تاریخچه جایجایی گره بالای ستون حذف شده در مدل "الف"

جدول ۳: جایجایی ماکزیمم گره بالای محل حذف ستون در مدل "الف"

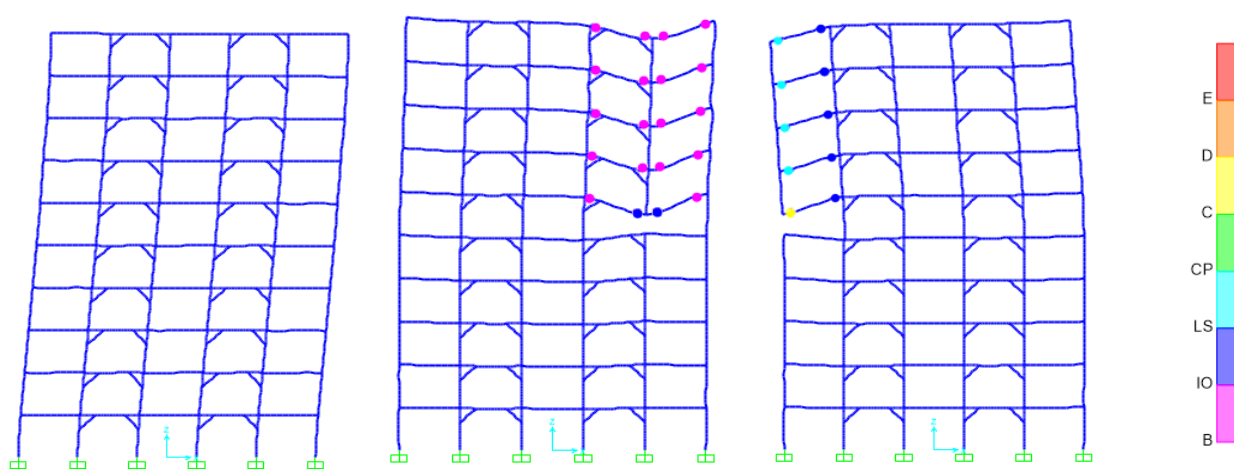
جایجایی ماکزیمم (cm)	حالت حذف
۰/۵۴	ستون A-1
۱۰/۳۱	ستون C-1
۳/۷۰	ستون و دستک B-1
۰/۴۴	ستون A-6
۱۸/۶۹	ستون C-6
۴/۰۳	ستون و دستک B-6
۱/۹	ستون A-10
۱۳/۷۵	ستون C-10
۴/۰۶	ستون و دستک B-10

### ۳-۲- نتایج تحلیل دینامیکی برای کلیه مدل‌ها

برای سایر مدل‌ها نیز روند فوق انجام شده و احتمال خرابی برای پنج مدل تعریف شده به صورت شکل ۱۱ می‌باشد. وضعیت تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل‌های ب و پ و ت و ث (برای سه حالت فرضی) در اشکال ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

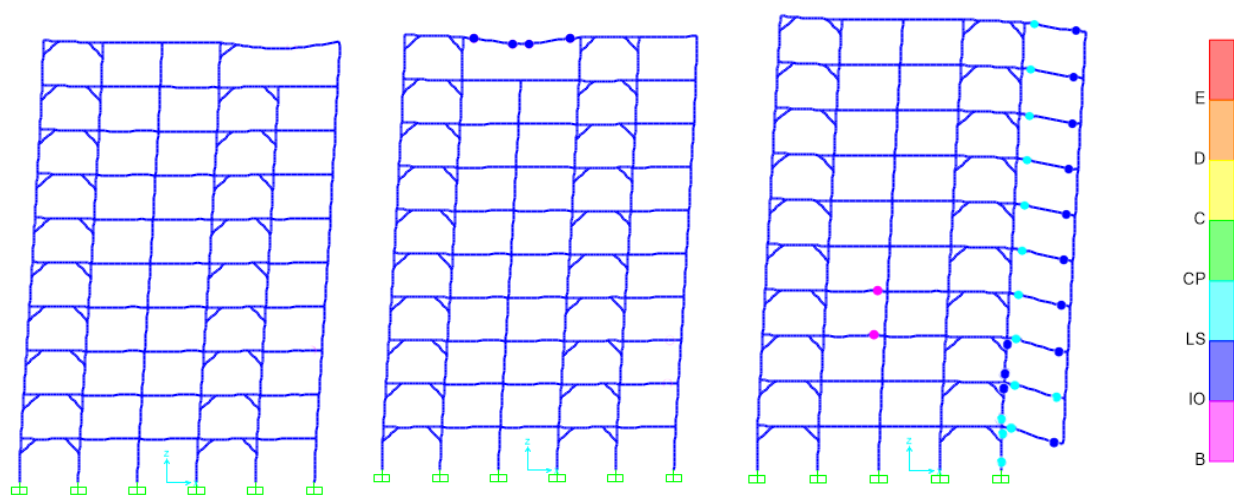


شکل ۱۱: درصد خرابی مدل های بررسی شده



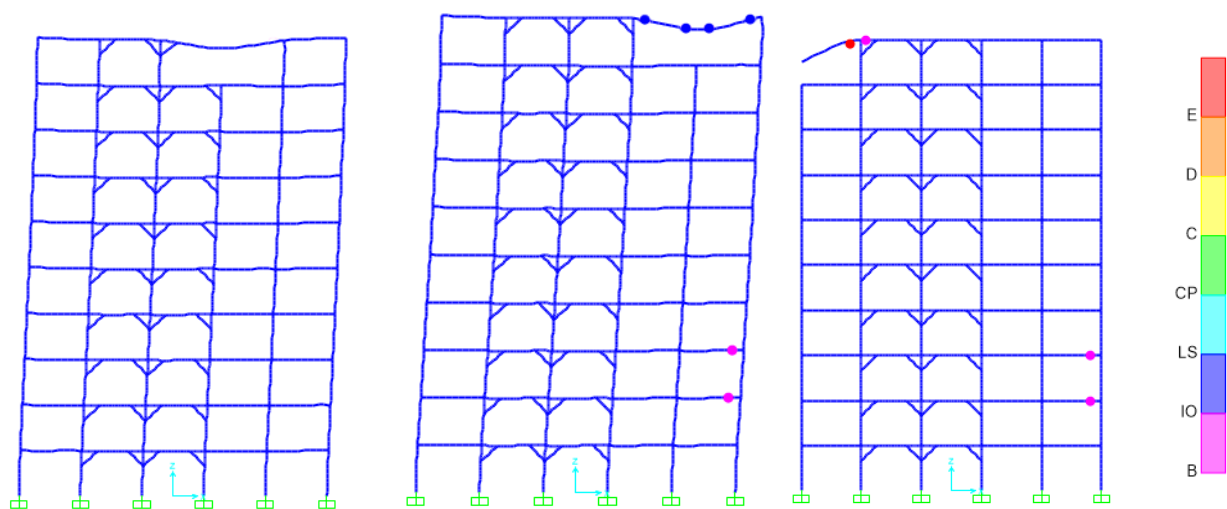
الف) عدم تشکیل مفاصل پلاستیک      ب) سطح عملکرد مجاز مفاصل پلاستیک      ج) سطح عملکرد غیر مجاز مفاصل پلاستیک

شکل ۱۲: مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل "ب" در سه حالت حذف اجزا



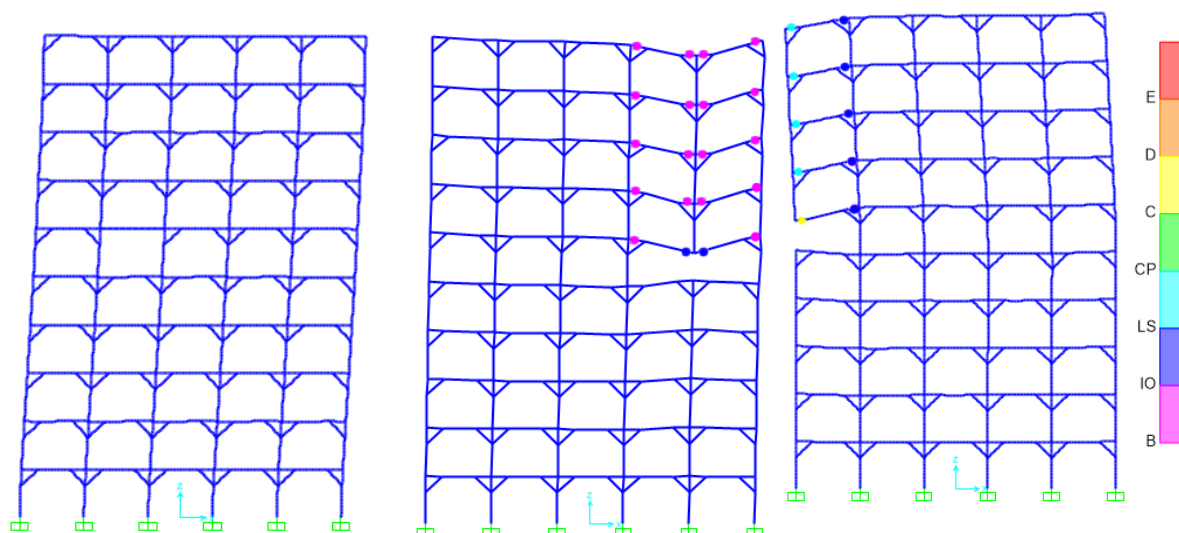
الف) عدم تشکیل مفاصل پلاستیک      ب) سطح عملکرد مجاز مفاصل پلاستیک      ج) سطح عملکرد غیر مجاز مفاصل پلاستیک

شکل ۱۳: مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل "ب" در سه حالت حذف اجزا



الف) عدم تشکیل مفاصل پلاستیک      ب) سطح عملکرد مجاز مفاصل پلاستیک      ج) سطح عملکرد غیرمجاز مفاصل پلاستیک

شکل ۱۴: مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل "ت" در سه حالت حذف اجزا



الف) عدم تشکیل مفاصل پلاستیک      ب) سطح عملکرد مجاز مفاصل پلاستیک      ج) سطح عملکرد غیرمجاز مفاصل پلاستیک

شکل ۱۵: مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل "ت" در سه حالت حذف اجزا

جدول ۴: جابجایی ماکزیمم گره بالای محل حذف ستون در مدل "ب"

حالت حذف	جابجایی ماکزیمم (cm)
ستون A-1	۹/۷۰
ستون C-1	۳/۲۶
ستون و دستک C-1	۳/۸۸
ستون A-6	۱۷/۶۸
ستون C-6	۳/۱۵
ستون و دستک C-6	۴/۳۶
ستون A-10	خرابی
ستون C-10	۳/۸۸
ستون و دستک C-10	۴/۱۴

جدول ۵: جابجایی ماکزیمم گره بالای محل حذف ستون در مدل "پ"

حالت حذف	جابجایی ماکزیمم ((cm))
ستون F-1	۱۹/۲
ستون C-1	۹/۷
ستون و دستک E-1	۳/۹۳
ستون F-6	۲۹/۴۶
ستون C-6	۱۷/۸۴
ستون و دستک E-6	۴/۷
ستون F-10	خرابی
ستون C-10	۱۳/۰۴
ستون و دستک E-10	۴/۳۵

جدول ۶: جابجایی ماکزیمم گره بالای محل حذف ستون در مدل "ت"

حالت حذف	جابجایی ماکزیمم (cm)
ستون A-1	۹/۹۵
ستون E-1	۱۰/۴۳
ستون و دستک D-1	۵/۸۶
ستون A-6	۱۸/۲۰
ستون E-6	۱۸/۴۴
ستون و دستک D-6	۵
ستون A-10	خرابی
ستون E-10	۱۳/۹۳
ستون و دستک D-10	۴/۴۱

جدول ۷: جابجایی ماکزیمم گره بالای محل حذف ستون در مدل "ث"

حالت حذف	جابجایی ماکزیمم (cm)
ستون A-1	۱/۶۵
ستون E-1	۲/۱۲
ستون و دستک C-1	۳/۶۲
ستون A-6	۰/۶۳
ستون E-6	۷/۴۳
ستون و دستک C-6	۱۰/۰۳
ستون A-10	۰/۲
ستون C-10	۱۲/۸۴
ستون و دستک B-10	۴/۱۶

بر اساس اشکال، جداول و نتایج حاصل شده، مشخص می‌شود که هر چه دهانه‌های تقویت شده با دستک از دهانه‌های کناری به سمت دهانه‌های میانی سازه قرار گیرند (نتایج مربوط به مدل‌های الف تا ت) درصد احتمال خرابی مدل‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده افزایش پیدا می‌کند تا جایی که مدل "ت" بیش‌ترین درصد احتمال خرابی را در بین مدل‌ها به خود اختصاص داده است. همچنین نتایج تحلیل حاکی از آن است که برای اعضای که نیروی محوری در آن‌ها تعیین‌کننده می‌باشد، حذف المان در طبقات پایین حالت بحرانی‌تری پدید

می‌آورد؛ اما در مورد لنگر خمشی عکس این موضوع صادق است. در حالت‌های حذف در طبقات بالایی همه مدل‌ها، مفاصل پلاستیک بیشتر در تیرها تشکیل شده‌اند ولی در حالات حذف مختلف در طبقات پایین، مفاصل پلاستیک در ستون‌ها نیز تشکیل شده‌اند. در نتیجه با حذف المان در طبقات پایین، خرابی در جهت قائم انتشار می‌یابد و با حذف المان در طبقات بالا خرابی در جهت افقی سازه گسترش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده، در حالت‌های حذف ستون میانی همچنین حالت حذف یک ستون و دستک و حالت حذف جفت دستک در طبقات بالایی سازه، سطوح عملکرد مفاصل پلاستیک در محدوده مجاز آیین‌نامه UFC قرار داشته‌اند؛ به عبارت دیگر در این حالت‌های حذف، خرابی در سازه رخ نخواهد داد. ولی در مدل‌های بدون دستک در دهانه‌های کناری با حذف ستون کناری در طبقه بالایی، خرابی را در سازه به بار خواهد آورد. با توجه به این توضیحات، با تغییر جا نمایی دستک در طبقات بالایی از دهانه‌های میانی و قرار دادن دستک‌ها در دهانه‌های کناری می‌توان درصد احتمال خرابی را کاهش داد. به عنوان مثال در مدل "ب" احتمال خرابی سازه ۳۳/۳۳٪ می‌باشد که می‌توان با تغییر جا نمایی دستک‌ها در این مدل و تبدیل کردن آن به مدل "ث" درصد احتمال خرابی را به ۱۶/۶۷٪ کاهش داد. این موضوع را می‌توان به سایر مدل‌ها هم نیز تعمیم داد؛ بنابراین اگر دستک‌ها بطور قائم گستر (آرایش متعارف) چیده شوند، کارایی آنها کاهش یافته و حساسیت سیستم به حذف عضو افزایش خواهد یافت.

در نهایت با توزیع و جا نمایی دستک در کل دهانه و ارتفاع سازه، می‌توان درصد احتمال خرابی را در برابر خرابی پیش‌رونده تا حد زیادی کاهش داد که این جا نمایی مناسب را می‌توان در مدل "ث" مشاهده کرد. در این مدل، از کل حالات حذف انتخاب شده بر اساس معیارهای آیین‌نامه UFC، در هیچ‌کدام از این حالت‌های حذف، چرخش مفاصل پلاستیک از مقادیر مجاز آیین‌نامه UFC فراتر نرفته است و این بدان معناست که در تمامی این حالت‌های حذف، خرابی پیش‌رونده در سازه اتفاق نخواهد افتاد؛ به عبارت دیگر قابلیت اطمینان این مدل در برابر خرابی پیش‌رونده زیاد می‌باشد. حتی می‌توان با تقویت و یا تعویض عضوی که در آن در اثر از بین رفتن عضو، مفاصل پلاستیک تشکیل شده است، که البته سطوح عملکرد تمامی آنها در سطح مجاز می‌باشد، می‌توان مقاومت این مدل را در برابر خرابی، بیشتر هم کرد. نکته قابل توجه در حالت‌های مختلف حذف در مدل "ث" عدم تغییرات گسترده تلاش‌ها و تغییر مکان‌های گرهی و عدم تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضا می‌باشد که می‌توان دلیل آن را به این صورت بیان کرد که با توزیع و جا نمایی مناسب دستک‌ها در دهانه‌ها و ارتفاع سازه، در محل حذف اعضا در این مدل، المان‌های سازه‌ای بیشتری وجود داشته و این موضوع موجب تقویت کنش زنجیره‌ای اعضا جهت حمل و انتقال بار و همچنین تثبیت فوری وضعیت به وجود آمده می‌گردد.

#### ۴- نتیجه گیری

تاثیر تقویت سازه‌های بتنی با دستک فلزی تحت بارهای لرزه‌ای در مطالعات پیشین انجام شده است. استفاده از این دستک‌ها به دلیل سهولت اجرایی می‌تواند یکی از راهکارهای پیشنهادی جهت مقاوم سازی سازه‌های بتنی در برابر خرابی پیش‌رونده باشد. با این وجود، بر خلاف مطالعات بسیار در موضوع تاثیر این دستک‌ها در سازه‌های فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده، پژوهش متمرکز در ارتباط با تاثیر این دستک‌ها در سازه‌های بتنی در برابر این نوع خرابی انجام نشده است. در این پژوهش بررسی تاثیر این دستک‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی بتنی انجام شد. در این تحقیق به منظور بررسی گسیختگی پیش‌رونده ساختمان ۱۰ طبقه بتنی قاب خمشی با شکل پذیری متوسط در ۵ حالت چیدمان مختلف دستک فولادی تقویتی طراحی شد. در همه مدل‌های مورد مطالعه در این تحقیق، با توجه به ۵ دهانه بودن قاب‌ها و با در نظر گرفتن تقارن، در سه طبقه: اول، ششم و دهم و در هر یک از این طبقات، چهار سناریو حذف ناگهانی عضو بررسی شده است. در تمامی مدل‌ها حذف ستون گوشه، حذف ستون میانی، حذف جفت دستک و حذف یک ستون و دستک متصل به آن چهار سناریو حذف عضو، در هر یک از طبقات نامبرده شده را تشکیل می‌دهند. نتایج حاصل از تحلیل خرابی پیش‌رونده انجام شده برای این سازه‌ها نشان داد که:

- ۱- سازه‌هایی که در برابر زلزله طراحی شده‌اند، لزوماً دارای مقاومت کافی در برابر خرابی پیش‌رونده نیستند.



- ۲- با تغییر جا نمایی دستک در طبقات بالایی از دهانه‌های میانی و قرار دادن دستک‌ها در دهانه‌های کناری می‌توان درصد احتمال خرابی را کاهش داد. در بررسی یکی از مدل‌ها درصد احتمال خرابی سازه از ۳۳/۳۳٪ با جابجایی دستک به دهانه‌های کناری به ۱۶/۶۷٪ کاهش پیدا کرده است.
- ۳- نتایج تحلیل حاکی از آن است که برای اعضای که نیروی محوری در آن‌ها تعیین‌کننده می‌باشد، حذف المان در طبقات پایین حالت بحرانی تری پدید می‌آورد؛ اما در مورد لنگر خمشی عکس این موضوع صادق است. در حالت‌های حذف در طبقات بالایی همه مدل‌ها، مفاصل پلاستیک بیشتر در تیرها تشکیل شده‌اند ولی در حالات حذف مختلف در طبقات پایین، مفاصل پلاستیک در ستون‌ها تشکیل شده‌اند. در نتیجه با حذف المان در طبقات پایین، خرابی در جهت قائم انتشار می‌یابد و با حذف در طبقات بالا خرابی در جهت افقی سازه گسترش می‌یابد.
- ۴- با توجه به نتایج بدست آمده، در حالت‌های حذف ستون میانی همچنین حالت حذف یک ستون و دستک و حالت حذف جفت دستک در طبقات بالایی سازه، سطوح عملکرد مفاصل پلاستیک در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار داشته‌اند؛ به عبارت دیگر در این حالت‌های حذف، خرابی در سازه رخ نخواهد داد. ولی در مدل‌های بدون دستک در دهانه‌های کناری با حذف ستون کناری در طبقه بالایی خرابی را در سازه به بار خواهد آورد. با توجه به این توضیحات، با تغییر جا نمایی دستک در طبقات بالایی از دهانه‌های میانی و قرار دادن دستک‌ها در دهانه‌های کناری می‌توان درصد احتمال خرابی را کاهش داد.
- ۵- با توزیع و جا نمایی دستک در کل دهانه و ارتفاع سازه، می‌توان درصد احتمال خرابی را در برابر خرابی پیش‌رونده تا حد زیادی کاهش داد. بدین ترتیب با بررسی و جابجایی دستک‌ها در بین مدل‌ها درصد احتمال خرابی در بین کلیه مدل‌ها از ۵۰٪ تا ۱۶/۶۷٪ کاهش یافته است.

## مراجع

- [1] Kiakojouri, F. De Biagi, V. Chiaia, B. and Sheidaii, M. R. (2020). Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering Structures*, 206, 110061.
- [2] Rahnvard, R. and Siahpolo, N. (2017). Function comparison between moment frame and moment frame with centrally braces in high-rise steel structure under the effect of progressive collapse. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4, 42-57. (In Persian)
- [3] Kim, H. (2006). *Progressive Collapse Behavior of Reinforced Concrete Structures with Deficient Details*, PhD Dissertation University of Texas at Austin.
- [4] Liu, M. and Pirmoz, A. (2016). Energy-based pull-down analysis for assessing the progressive collapse potential of steel frame buildings. *Engineering Structures*, 123(1), 372-378.
- [5] Kazemi-Moghaddam, A. and Sasani, M. (2015). Progressive collapse evaluation of Murrah Federal Building following sudden loss of column G20. *Engineering Structures*, 89, 162-171.
- [6] Sasani, M. and Sagioglu, S. (2008). Progressive collapse of reinforced concrete structures: a multihazard perspective. *ACI Structural Journal*, 105(1), 96-103.
- [7] Tsai, M. and Lin, B. (2008). Investigation of Progressive Collapse Resistance and Inelastic Response for an Earthquake-Resistant RC Building Subjected to Column Failure. *Engineering Structures*, 30, 3619-3628.
- [8] Pachenari, A. Keramati, A. and Pachenari, Z. (2013). Investigation of progressive collapse in intermediate RC frame structures. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(2), 116-125.
- [9] Kokot, S. Anthoine, A. Negro, P. and Solomos, G. (2012). Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse. *Engineering Structures*, 40, 205-217.
- [10] Pampanin, S. Christopoulos, C. and Chen T. H. (2006). Development and validation of a metallic haunch seismic retrofit solution for existing under-designed RC frame buildings. *Earthquake Engineering & structural Dynamics*, 35 (14), 1739-1766.
- [11] Eligehausen, R. Genesio, G. Ožbolt, J. and Pampanin, S. (2008). *3D analysis of seismic response of RC beam-column exterior joints before and after retrofit*. In *Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II*, edited by Alexander, M. G., Beushausen, H. Dehn, F. and Moyo, P. London: Taylor & Francis.
- [12] Sharbatdar, M. K. Kheyroddin, A. and Emami, E. (2012). Cyclic performance of retrofitted reinforced concrete beam-column joints using steel prop. *Construction and Building Materials*, 36, 287-294.

- [13] Feng, P. Qiang, H. Qin, W. and Gao, M. (2017). A novel kinked rebar configuration for simultaneously improving the seismic performance and progressive collapse resistance of RC frame structures. *Engineering Structures*, 147, 752–767.
- [14] Sasmal, S. and Voggu, S. (2018). Strut-Relieved Single Steel Haunch Bracing System for Mitigating Seismic Damage of Gravity Load Designed Structures. *Journal of Structural Engineering*, 144(10), 04018167:1-16.
- [15] Rezazadeh, P. Sheidaii, M. R. and Salmasi, A. (2018). Assessment of Progressive Collapse Behaviour of Moment Frames Strengthened with Knee Elements. *International Journal of Steel Structures*, 19(2), 517–529.
- [16] Zahrai, S.M. and Ezoddin, A. (2018). Cap truss and steel strut to resist progressive collapse in RC frame structures. *Steel and Composite Structures*, 26 (5), 635-647
- [17] Ahmad, N. Akbar, J. Rizwan, M. Alam, B. Khan, A. N. and Lateef, A. (2019). Haunch retrofitting technique for seismic upgrading deficient RC frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(7), 3895-3932.
- [18] Computers and structures- Inc, (2016). SAP2016 Software. Berkeley, CA.
- [19] MHUD, (2009). *Iranian national building code (part 6): loading*, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran.
- [20] MHUD, (2009). *Iranian national building code (part 9): Concrete structure design*, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran.
- [21] Ministry of Roads and Urban Development, (2015). *The regulations governing the design of buildings against earthquake2800*. Fourth edition. <http://www.std2800.ir>. Accessed February 23, 2020.
- [22] Federal Emergency Management Agency. (2000). *Pre Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA 356, Washington, D.C.
- [23] Unified Facilities Criteria (UFC)-DoD., (2205), *Design of buildings to resist progressive collapse*. Department of Defense.