

## بررسی خرابی پیشرونده در قاب‌های خمشی فولادی با پلان L شکل به کمک آنالیز حساسیت

مهدیه مداحی<sup>۱\*</sup>، علی خیرالدین<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- عضو قطب علمی زیر ساخت‌های عمرانی دانشگاه تهران و استاد دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

خرابی پیشرونده به گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه اطلاق می‌شود. به دنبال آسیب موضعی در اثر حذف یک یا چند عضو باربر، خرابی به صورت زنجیره‌ای در سازه گسترش می‌یابد و باعث خرابی بخشی از سازه یا کل سازه می‌گردد. در بحث خرابی پیشرونده تعیین المانی که بیشترین پتانسیل ایجاد خرابی پیشرونده را دارا می‌باشد، اهمیت دارد، زیرا با تقویت این المان می‌توان عملکرد سازه را بهبود بخشید. در این مقاله به بررسی موقعیت ستون بحرانی در پلان L شکل پرداخته شده است. برای این منظور سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده‌اند. برای تعیین المان کلیدی در این نوع پلان‌ها، ستون‌ها در موقعیت‌های مختلف حذف شده و سازه‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته قرار گرفته‌اند. بر اساس مقادیر ظرفیت باربری سازه، شاخص حساسیت محاسبه شده و المانی که بیشترین مقدار شاخص حساسیت را دارا باشد به عنوان المان کلیدی در خرابی پیشرونده تعیین می‌شود. نتایج بدست آمده در این مقاله نشان می‌دهند که در پلان L شکل، ستون مرکزی بحرانی‌ترین ستون در خرابی پیشرونده می‌باشد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌هایی با ارتفاع بیشتر، حذف ستون می‌تواند شرایط بحرانی تری از نظر خرابی پیشرونده به وجود آورد.

**کلمات کلیدی:** خرابی پیشرونده، تحلیل بار افزایش یافته، شاخص حساسیت، حذف ستون، المان کلیدی.

\*نویسنده مسئول: مهدیه مداحی

پست الکترونیکی: m.maddah93@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۸

خرابی پیشرونده به گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه اطلاق می‌شود. به دنبال آسیب موضعی در اثر حذف یک یا چند عضو باربر، خرابی به صورت زنجیره‌ای در سازه گسترش می‌یابد و باعث خرابی بخشی از سازه یا کل سازه می‌گردد. خرابی پیشرونده اولین بار پس از واقعه ساختمان رونان پوینت در انگلیس مطرح شد و از آن زمان تاکنون تحقیقات وسیعی در این خصوص صورت گرفته است. بعد از خرابی ساختمان رونان، فراهیان [۱] به بررسی امکان ایجاد تغییرات در استانداردهای بریتانیا و کانادا در جهت ممانعت از بروز خرابی پیشرونده در ساختمان‌ها پرداخت. وی معتقد بود که یک سازه مقاوم در مقابل زلزله می‌تواند در برابر توسعه خرابی نیز بعد از اینکه یکی از اعضا باربری خود را از دست دهد، مقاومت نشان دهد. کیم [۲] برای سازه‌های قاب دو بعدی از روش‌های استاتیکی خطی و دینامیکی غیرخطی استفاده کردند. آنها دریافتند که قاب‌های خمشی طراحی شده برای بارهای جانبی، در خرابی پیشرونده آسیب‌پذیری کمتری دارند. آنها مشاهده کردند زمانی که ستون گوشه در پلان حذف می‌شود پتانسیل خرابی پیشرونده مقدار بیشتری را دارد و احتمال گسیختگی با افزایش تعداد طبقات کاهش می‌یابد.

ویو [۳] نشان داد که خرابی پیشرونده می‌تواند در هنگام وقوع زلزله نیز اتفاق افتد. بنابراین خرابی پیشرونده فقط به بارهای انفجاری و ثقلی محدود نمی‌شود. ویو و لائو [۴] همچنین روی تأثیرات بار جانبی در رفتار سازه‌ها در خرابی پیشرونده تمرکز کردند و به این نتیجه رسیدند که خرابی پیشرونده لرزه‌ای با اصلاح روش‌های آنالیزی، انجام می‌شود. کیپل و تاویل [۵]، خرابی پیشرونده را در قاب‌های مهاربند شده همگرا و واگرا بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سازه‌های دارای مهاربندهای واگرا نسبت به سازه‌های دارای مهاربند همگرا در خرابی پیشرونده آسیب‌پذیری کمتری دارند.

خیرالدین و مشهدی‌علی [۶]، به بررسی خرابی پیشرونده ساختمان‌های بلند فولادی دارای سیستم مهاربندی شش وجهی پرداخته و با انجام آنالیزهای استاتیکی غیر خطی (پوش عمودی) و تاریخچه زمانی دینامیکی بر روی این ساختمان‌ها به این نتیجه دست یافتند که سیستم مهاربندی شش وجهی عملکرد خوبی نسبت به سیستم‌های مهاربندی قطری در انتقال نیروها به هنگام حذف ناگهانی ستون در خرابی پیشرونده دارند.

خیرالدین، گرامی و مهرابی [۷]، به بررسی پتانسیل خرابی در سازه‌های فولادی طرح شده بر اساس آیین‌نامه ایران پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که بحث کنترل خرابی پیشرونده در سازه‌های طرح شده بر اساس آیین‌نامه ایران باید وارد گردد. علاوه بر این نتایج تحقیقات آنها نشان داد علاوه بر خود المان سازه‌ای، موقعیت قرارگیری المان نیز در بحث خرابی پیشرونده اهمیت دارد.

کیم و هونگ [۸]، عملکرد خرابی پیشرونده را در سازه‌های بلند نامنظم، با تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی غیرخطی بررسی کردند و دریافتند سازه‌هایی که دارای المان‌های بیشتری هستند در برابر خرابی پیشرونده مقاومت بیشتری دارند. آستانه اصل و همکاران [۹]، مقاومت یک سازه فولادی معمولی و سیستم کف آن را در مقابل خرابی پیشرونده در اثر حذف یک ستون مطالعه کردند. آنها همچنین در سیستم دارای کابل فولادی به بررسی توانایی سیستم برای ممانعت از پروسه خرابی پرداختند [۱۰].

فراگوپول [۱۱] و ایتو به همراه محققین دیگر [۱۲]، شاخص مربوط به نامعینی و المان کلیدی را معرفی نمودند. کیم [۱۳] و ایتو و محققین دیگر [۱۴]، پتانسیل خرابی پیشرونده را با عمل زنجیروار آن در طول اعمال یک تغییر شکل بزرگ مطالعه نمودند. علاوه بر این، مطالعات تحلیلی مربوط به نامعینی و خرابی پیشرونده روی یک ساختمان واقعی توسط اُهی و محققین دیگر [۱۵] و کیم و همکاران [۱۶] انجام شد. تحقیقات دیگری [۱۷] در زمینه شاخص مربوط به نامعینی یا المان‌های کلیدی توسط محققین صورت گرفته است و در تمامی این مطالعات حفظ مقاومت یک سازه پس از خرابی اعضای از سازه به واسطه یک حادثه اتفاقی مورد بررسی قرار گرفت و مقاومت حاصل با مقاومت سازه در حالت اصلی مقایسه گردید.

خیرالدین و فلاح زاده [۱۸]، به مطالعه خرابی پیشرونده در قاب‌های خمشی فولادی و بررسی ستون بحرانی پرداختند. آنها با انجام آنالیزهای استاتیکی غیرخطی و با توجه به شاخص حساسیت، به این نتیجه رسیدند که در سازه قاب خمشی فولادی با پلان مستطیلی، حذف ستون گوشه وضعیت بحرانی‌تری را ایجاد می‌کند.

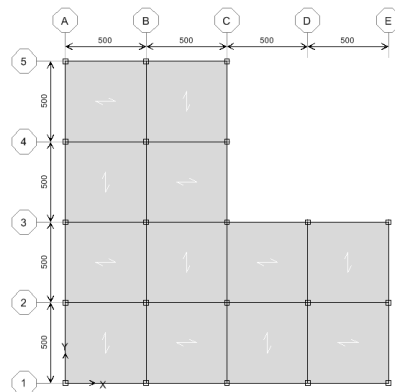
## ۲- هدف تحقیق

در این مقاله، هدف تعیین بحرانی‌ترین حالت حذف ستون در سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی و با پلان L شکل می‌باشد. برای این منظور، با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزایشنده قائم بر روی سازه‌های مذکور، به بررسی عملکرد سازه در موقعیت‌های مختلف حذف ستون در پلان و تأثیر آن در پتانسیل ایجاد خرابی‌های پیشرونده پرداخته شده است. برای تعیین بحرانی‌ترین حالت حذف ستون از شاخص حساسیت استفاده شده است. شاخص حساسیت از طریق تحلیل حساسیت تخمین زده می‌شود، که بیان‌گر عدم حالت ارتجاعی ظرفیت تحمل بار عمودی ناشی از حذف یک عضو بر مبنای تحلیل پلاستیک می‌باشد. ضریب حساسیت به صورت نسبت ظرفیت باربری سازه پس از حذف یک عضو و یا مجموعه‌ای از یک عضو مجاور، به ظرفیت باربری سازه کامل می‌باشد. عضو دارای بالاترین شاخص حساسیت به عنوان یک المان کلیدی شناخته می‌شود [۱۴].

## ۳- مدل‌سازی

مدل‌های سازه‌ای مورد استفاده در این مقاله، مدل‌های سه بعدی با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه در نظر گرفته شده‌اند. سازه‌های مورد نظر دارای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۳/۵ متر با پلان L شکل با دهانه‌هایی با طول یکسان ۵ متر مطابق شکل ۱ می‌باشد. در این سازه‌ها تکیه‌گاه‌ها به صورت اتصال گیردار فرض شده‌اند. سازه‌های مورد نظر در منطقه با خطر نسبی زیاد و بر روی خاک نوع II واقع شده‌اند. فولاد مورد استفاده فولاد St37 دارای تنش تسلیم  $2400 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد.

در این مقاله از مباحث ششم [۱۹] و دهم [۲۰]، جهت بارگذاری و طراحی سازه‌ها و از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۱]، جهت بارگذاری جانبی آن‌ها استفاده شده است. علاوه بر این، از آیین‌نامه GSA [۲۲]، برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشنده قائم استفاده شده است. بر اساس مباحث ششم مقررات ملی ساختمان، بار ثقلی مرده و زنده در طبقات و بام به ترتیب  $500 \text{ kg/m}^2$  و  $200 \text{ kg/m}^2$  منظور شده است. بار معادل تیغه‌بندی‌ها نیز  $100 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است که به بار مرده طبقات افزوده می‌گردد. مشخصات ابعادی مقاطع فولادی برای سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در جداول ۱ تا ۳ آورده شده است. این ابعاد، با روش سعی و خطا و با کنترل جابجایی جانبی سازه در حد مجاز استاندارد ۲۸۰۰، با استفاده از نرم‌افزار Etabs2000 [۲۳] بدست آمده است.



شکل ۱: پلان L شکل سازه‌های مورد مطالعه.

جدول ۱: مشخصات ابعادی مقاطع فولادی سازه ۱۰ طبقه

تیر	ستون	طبقات
W12X45	BOX45X45X1.5	۱-۳
W12X45	BOX40X40X1	۴-۶
W12X40	BOX30X30X1	۷
W12X40	BOX25X25X1	۸
W10X30	BOX25X25X1	۹-۱۰

جدول ۲: مشخصات ابعادی مقاطع فولادی سازه ۱۵ طبقه

تیر	ستون	طبقات
W14X48	BOX50X50X2	۱-۳
W14X48	BOX45X45X1.5	۴-۶
W14X43	BOX40X40X1.5	۷-۹
W12X35	BOX35X35X1.5	۱۰-۱۲
W10X30	BOX30X30X1	۱۳-۱۵

جدول ۳: مشخصات ابعادی مقاطع فولادی سازه ۲۰ طبقه

تیر	ستون	طبقات
W14X48	BOX70X70X2	۱-۳
W14X48	BOX60X60X2	۴-۶
W14X48	BOX55X55X2	۷-۹
W14X48	BOX45X45X1.5	۱۰-۱۲
W12X40	BOX40X40X1.5	۱۳-۱۵
W12X35	BOX35X35X1.5	۱۶
W10X30	BOX35X35X1.5	۱۷-۱۸
W10X30	BOX30X30X1	۱۹-۲۰

#### ۴- تحلیل‌های انجام گرفته

##### ۴-۱- تحلیل استاتیکی خطی معادل

در این روش نیروی جانبی زلزله بر اساس ضوابط آیین‌نامه تعیین شده و به صورت استاتیکی در امتدادها و جهات مختلف به سازه اعمال می‌گردد و سازه با فرض رفتار خطی تحلیل می‌شود. در این مقاله برای طراحی سازه از تحلیل استاتیکی خطی معادل بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم استفاده شده است.

##### ۴-۲- تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته قائم

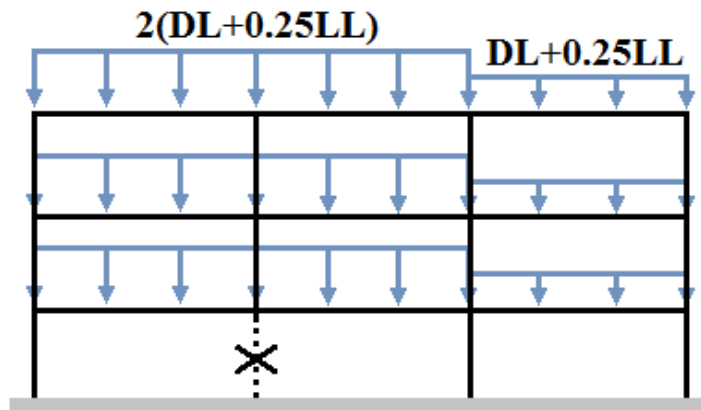
##### ۴-۲-۱- مدلسازی غیرخطی المان‌ها

در تحلیل‌های غیرخطی دو نوع اثرات غیرخطی می‌توان در نظر گرفت. نخست تحلیل غیرخطی هندسی می‌باشد که مربوط به اثرات  $P-\Delta$  و تغییرشکل‌های بزرگ است و دیگری اثرات غیرخطی مربوط به مصالح می‌باشد. اگر پاسخ‌های سازه برای طراحی، به کمک

روش‌های غیرخطی تعیین شوند، رابطه بار- تغییرشکل قطعات به صورت روابط غیرخطی بیان می‌شوند. مصالح و مؤلفه‌های سازه‌ای اصلی یک یا چند کنش (یا نیرو) و تغییرشکل‌های وابسته دارند. روابط بین این دو، رابطه غیرخطی F-D (رابطه نیرو- تغییرشکل یا رابطه لنگر- انحنا) نامیده می‌شود، که برای مدلسازی مؤلفه‌های غیرارتجاعی می‌شود. در این مقاله، از روابط FEMA 356 [۲۴] برای مدلسازی مؤلفه‌های غیر ارتجاعی استفاده شده است.

### ۲-۲-۴- ترکیبات بارگذاری در تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشده قائم

بر اساس آیین‌نامه GSA، برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشده قائم، از ترکیب بار  $2(DL+0.25LL)$  در دهانه‌های مربوط به ستون حذف شده و از ترکیب بار  $(DL+0.25LL)$  در بقیه دهانه‌ها استفاده می‌گردد. در شکل ۲ نحوه ترکیبات بارگذاری در دهانه‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲: بارگذاری به کار رفته در تحلیل استاتیکی غیرخطی پس از حذف ستون بر اساس آیین‌نامه GSA [۲۲].

در تحلیل استاتیکی غیرخطی پس از حذف ستون مورد نظر و اعمال ترکیبات بارگذاری آیین‌نامه GSA، سازه تحت بارهای افزایشی ثقلی تحت تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشده قائم، منحنی‌های نیرو- تغییر مکان می‌باشند. بر اساس این منحنی‌ها می‌توان مقادیر ظرفیت کلی سازه قبل و بعد از حذف ستون مربوطه را بدست آورد.

### ۳-۴- آنالیز حساسیت در خرابی پیشرونده

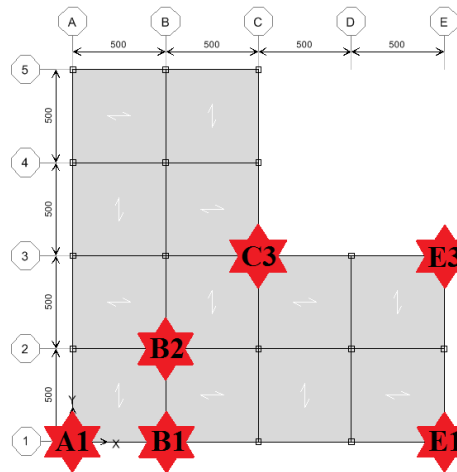
شاخص حساسیت که برای تعیین المان کلیدی در خرابی پیشرونده به کار می‌رود، بر اساس ظرفیت کلی سازه قبل و بعد از حذف ستون محاسبه می‌شود. این شاخص به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۱۵]:

$$SI = (\lambda_0 - \lambda_{damage}) / \lambda_0 \quad (1)$$

که در این رابطه  $\lambda_0$  ظرفیت باربری کلی پیش از حذف ستون و  $\lambda_{damage}$  ظرفیت باربری پس از حذف ستون می‌باشد. هر چه شاخص حساسیت برای یک المان بیشتر باشد، قابلیت باربری سازه در صورت حذف آن عضو کمتر خواهد بود. بنابراین، المانی که شاخص حساسیت مربوط به آن از همه بیشتر باشد، المان کلیدی سازه خواهد بود.

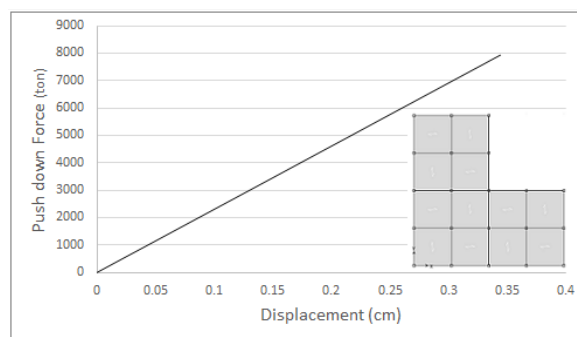
## ۵- نتایج

در این مقاله، به منظور تعیین بحرانی‌ترین ستون در فرآیند انهدام پیشرونده ستون‌های نشان داده شده در شکل ۳ در طبقه اول به ترتیب حذف و تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته انجام شده است.

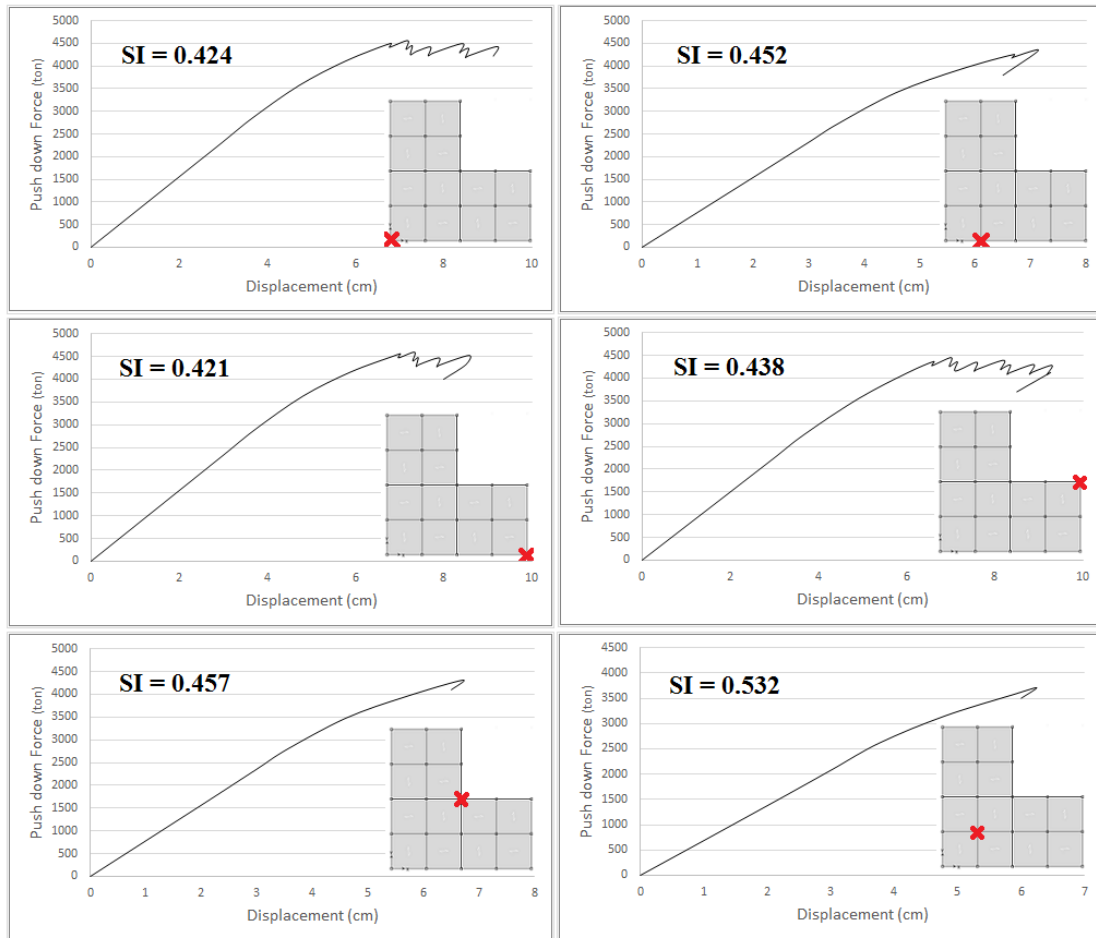


شکل ۳: موقعیت‌های مختلف ستون حذف شده در پلان طبقه اول.

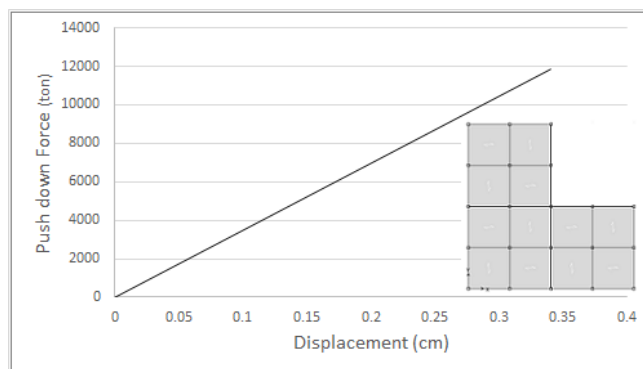
منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته برای موقعیت‌های مختلف حذف ستون در طبقه اول در سازه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در شکل‌های ۴ تا ۹ آورده شده است. شکل‌های ۴، ۶ و ۸ مربوط به حالت‌هایی هستند که ستون حذف نشده است. بر اساس این منحنی‌ها می‌توان مقدار ظرفیت کل سازه پیش از حذف ستون را بدست آورد. شکل‌های ۵، ۷ و ۹ مربوط به موقعیت‌های مختلف حذف ستون در پلان می‌باشند، که مقدار ظرفیت کلی سازه پس از حذف ستون را نشان می‌دهند. بر اساس این مقادیر شاخص حساسیت برای هر کدام از حالت‌های حذف ستون بدست آمده است.



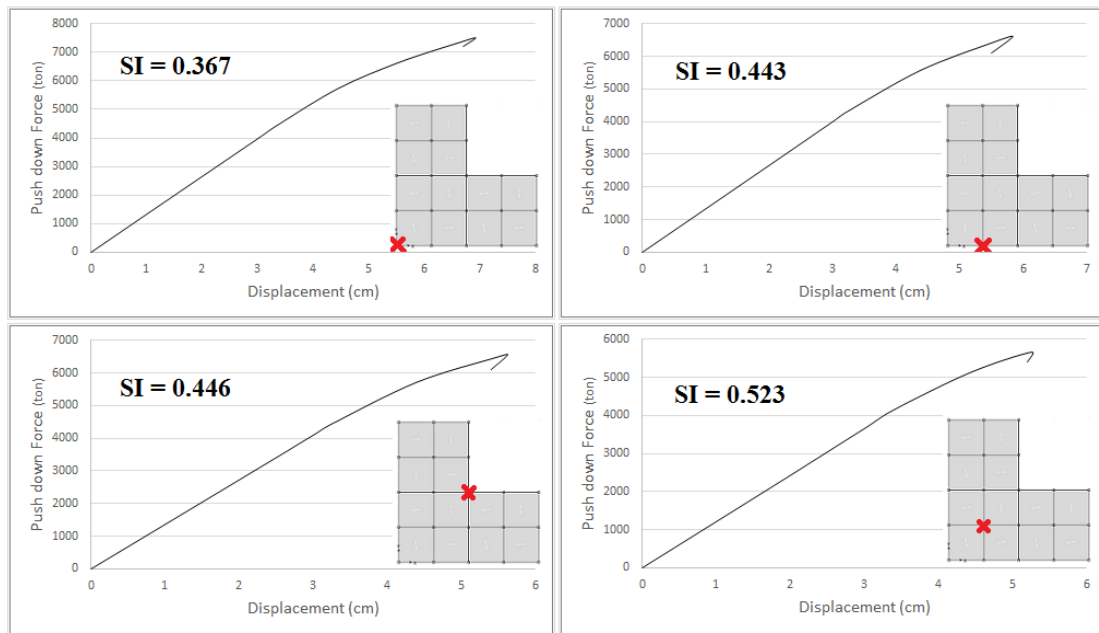
شکل ۴: نمودار نیرو-جابجایی سازه ۱۰ طبقه قبل از حذف ستون.



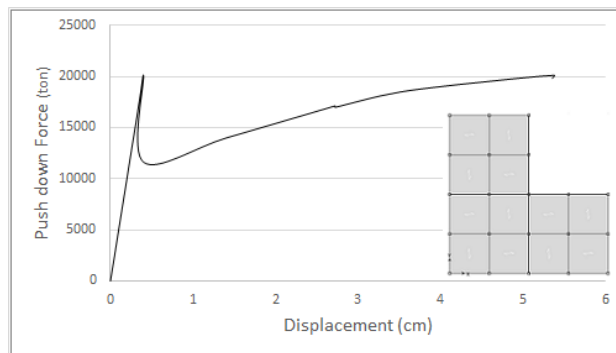
شکل ۵: نمودار نیرو-جابجایی سازه ۱۰ طبقه در موقعیت‌های مختلف حذف ستون در طبقه اول.



شکل ۶: نمودار نیرو-جابجایی سازه ۱۵ طبقه قبل از حذف ستون.



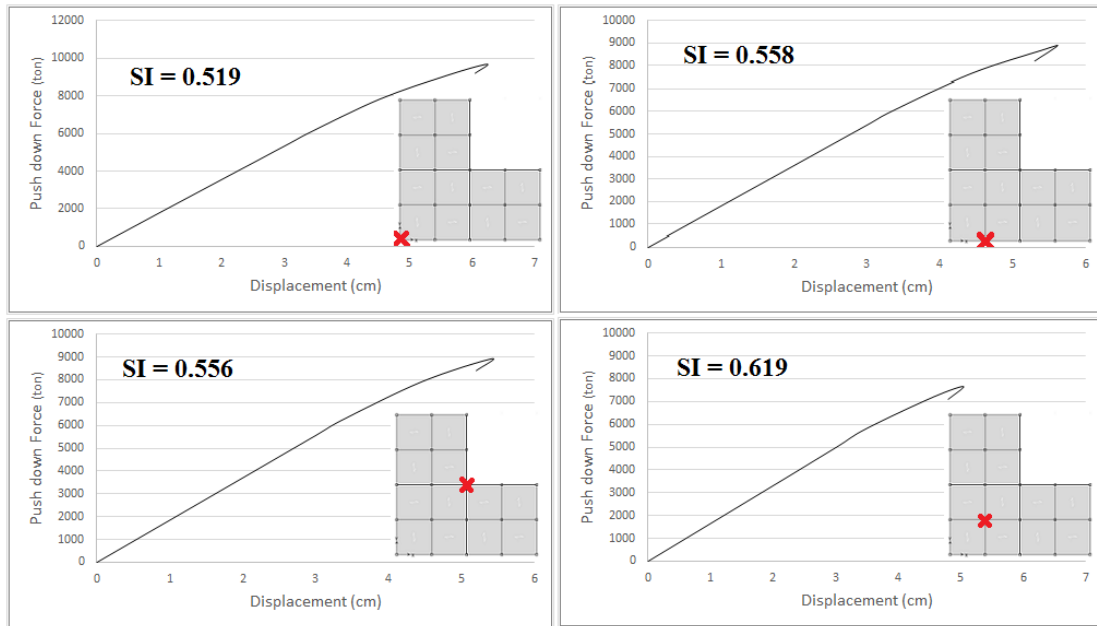
شکل ۷: نمودار نیرو-جابجایی سازه ۱۵ طبقه در موقعیت‌های مختلف حذف ستون در طبقه اول.



شکل ۸: نمودار نیرو-جابجایی سازه ۲۰ طبقه قبل از حذف ستون.

برای سازه ۱۰ طبقه تمامی منحنی‌های بار-جابجایی بدست آمده از بررسی موقعیت‌های مختلف حذف ستون در پلان، آورده شده است. ولی برای سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه برای کاهش حجم نمودارها، از منحنی‌های مربوط به حذف ستون در گوشه‌ها تنها منحنی مربوط به حذف ستون در گوشه A1، آورده شده است. علاوه بر این، در جداول ۴ تا ۶ مقادیر شاخص حساسیت و درصد خرابی کلی سازه برای سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در تمامی حالت‌های حذف ستون ذکر شده است.





شکل ۹: نمودار نیرو-جابجایی سازه ۲۰ طبقه در موقعیت‌های مختلف حذف ستون در طبقه اول الف) ستون گوشه (A1)، ب) ستون پیرامونی (B1)، ج) ستون گوشه فرورفته (C3)، د) ستون مرکزی (B2).

جدول ۴: مقادیر شاخص حساسیت برای سازه ۱۰ طبقه

ستون حذف شده	$\lambda_0$ (ton)	$\lambda_{damage}$ (ton)	SI	درصد خرابی کل
A1	۷۹۳۱/۳	۴۵۶۴/۶	۰/۴۲۴	۴۲/۴
B1	۷۹۳۱/۳	۴۳۴۵/۸	۰/۴۵۲	۴۵/۲
E1	۷۹۳۱/۳	۴۵۹۵/۴	۰/۴۲۱	۴۲/۱
E3	۷۹۳۱/۳	۴۴۵۳/۳	۰/۴۳۸	۴۳/۸
C3	۷۹۳۱/۳	۴۳۰۹/۸	۰/۴۵۷	۴۵/۷
B2	۷۹۳۱/۳	۳۷۱۱/۱	۰/۵۳۲	۵۳/۲

جدول ۵: مقادیر شاخص حساسیت برای سازه ۱۵ طبقه

ستون حذف شده	$\lambda_0$ (ton)	$\lambda_{damage}$ (ton)	SI	درصد خرابی کل
A1	۱۱۸۵۸/۹	۷۵۰۶/۶	۰/۳۶۷	۳۶/۷
B1	۱۱۸۵۸/۹	۶۶۱۱/۱	۰/۴۴۳	۴۴/۳
E1	۱۱۸۵۸/۹	۷۵۷۷/۲	۰/۳۶۱	۳۶/۱
E3	۱۱۸۵۸/۹	۷۳۷۱/۱	۰/۳۷۸	۳۷/۸
C3	۱۱۸۵۸/۹	۶۵۶۴/۶	۰/۴۴۶	۴۴/۶
B2	۱۱۸۵۸/۹	۵۶۶۰/۳	۰/۵۲۳	۵۲/۳

جدول ۶: مقادیر شاخص حساسیت برای سازه ۲۰ طبقه

ستون حذف شده	$\lambda_0$ (ton)	$\lambda_{\text{damage}}$ (ton)	SI	درصد خرابی کل
A1	۲۰۱۱۰/۶	۹۶۷۸/۱	۰/۵۱۹	۵۱/۹
B1	۲۰۱۱۰/۶	۸۸۸۸/۷	۰/۵۵۸	۵۵/۸
E1	۲۰۱۱۰/۶	۹۸۵۰/۵	۰/۵۱۰	۵۱
E3	۲۰۱۱۰/۶	۹۴۸۷/۵	۰/۵۲۸	۵۲/۸
C3	۲۰۱۱۰/۶	۸۹۱۹/۲	۰/۵۵۶	۵۵/۶
B2	۲۰۱۱۰/۶	۷۶۶۲/۸	۰/۶۱۹	۶۱/۹

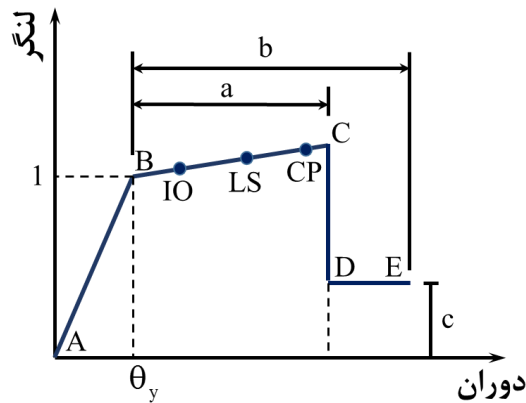
همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص حساسیت برای هر کدام از موقعیت‌های حذف ستون در سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در اشکال ۴ تا ۹ و جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است. با مقایسه این مقادیر مشاهده می‌شود که در سازه‌های فولادی با پلان L شکل ستون واقع در مرکز (B2) دارای بیشترین مقدار شاخص حساسیت است، در نتیجه این ستون بایستی به عنوان المان کلیدی در انهدام پیشرونده مدنظر قرار گیرد؛ چرا که بیشترین پتانسیل ایجاد خرابی پیشرونده و در عین حال کمترین عملکرد زنجیره‌ای را دارا بوده و با حذف این ستون، کاهش ظرفیت نهایی سازه افزایش خواهد یافت. علاوه بر این، بر اساس جداول ۴ تا ۶ مشاهده می‌شود که در سازه‌های فولادی با پلان L شکل مقدار شاخص حساسیت در ستون‌های گوشه، دارای کمترین مقدار می‌باشند.

در جدول ۷ مقادیر شاخص حساسیت و درصد خرابی کلی سازه به ازای نسبت ابعادی کل سازه (نسبت ارتفاع کل سازه به طول پلان) آورده شده است. بر اساس این جدول، مقایسه مقادیر شاخص حساسیت بر اساس نسبت ابعادی کل، نشان می‌دهند مقادیر این شاخص در بیشترین نسبت ابعادی کل (سازه ۲۰ طبقه) دارای بیشترین مقدار می‌باشد، این امر نشان‌دهنده این مطلب است که در سازه‌هایی با ارتفاع بیشتر، حذف ستون می‌تواند شرایط بحرانی تری را به لحاظ خرابی پیشرونده به وجود آورد.

جدول ۷: مقادیر شاخص حساسیت به ازای نسبت ابعادی کل

نوع سازه	ارتفاع (متر)	طول (متر)	نسبت ابعادی کل	SI	درصد خرابی کل
۱۰ طبقه	۳۵	۲۰	۱/۷۵	۰/۵۳۲	۵۳/۲
۱۵ طبقه	۵۲/۵	۲۰	۲/۶	۰/۵۲۳	۵۲/۳
۲۰ طبقه	۷۰	۲۰	۳/۵	۰/۶۱۹	۶۱/۹

در این مقاله، همچنین به بررسی تشکیل مفاصل پلاستیک در بحث خرابی پیشرونده پرداخته شده است. شکل ۱۰ ارتباط لنگر خمشی با دوران اعضای سازه‌ای توصیه شده در ASCE/SEI 41-06 [۲۵] را نشان می‌دهد. نقاط B و C به ترتیب بیان‌گر مقاومت تسلیم اسمی و مقاومت نهایی هستند. سختی پس تسلیمی سه درصد سختی اولیه است. نقاط D و E نشان‌دهنده حالت شکست اولیه و نهایی می‌باشند. همچنین بر روی نمودار، حالت‌های حدی عملکرد از قبیل IO (استفاده بی‌وقفه)، LS (ایمنی جانی) و CP (آستانه فروریزش) نشان داده شده است. ضرایب a، b و c نیز معرف رفتار غیرخطی هستند و مطابق ASCE/SEI 41-06 بدست می‌آیند.



شکل ۱۰: رابطه غیر خطی بار-جابجایی اعضای خمشی [۲۵].

در جداول ۸ تا ۱۰، تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در محدوده‌های مختلف B تا IO، محدوده IO (استفاده بی‌وقفه)، LS (ایمنی جانی)، CP (آستانه فروریزش) و E (شکست نهایی) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در سازه‌هایی با ارتفاع کمتر تعدادی از المان‌ها دچار شکست نهایی شده‌اند و با افزایش ارتفاع سازه تعداد این المان‌ها کاهش یافته است، به طوری که در سازه ۲۰ طبقه هیچ یک از المان‌ها به مرحله شکست نهایی نرسیده‌اند.

جدول ۸: تعداد مفاصل تشکیل شده در محدوده‌های مختلف در سازه ۱۰ طبقه

تعداد مفاصل تشکیل شده					ستون حذف شده
E	CP	LS	IO	B	
۷	۱	۱	۶	۱۴	A1
۱	۲	۲	۱۴	۲۱	B1
۵	۱	۲	۶	۱۴	E1
۸	۱	۲	۳	۱۴	E3
۰	۲	۲	۲۳	۲۱	C3
۰	۳	۰	۲۶	۱۳	B2

جدول ۹: تعداد مفاصل تشکیل شده در محدوده‌های مختلف در سازه ۱۵ طبقه

تعداد مفاصل تشکیل شده					ستون حذف شده
E	CP	LS	IO	A	
۱	۱	۴	۱۱	۱۸	A1
۱	۲	۱	۱۷	۲۷	B1
۰	۲	۴	۱۲	۲۰	E1
۰	۲	۴	۱۰	۱۴	E3
۰	۰	۰	۲۴	۳۸	C3
۰	۰	۱	۱۷	۳۹	B2

جدول ۱۰: تعداد مفاصل تشکیل شده در محدوده‌های مختلف در سازه ۲۰ طبقه

تعداد مفاصل تشکیل شده					ستون حذف شده
E	CP	LS	IO	A	
۰	۲	۰	۱۶	۲۱	A1
۰	۲	۱	۲۲	۲۵	B1
۰	۲	۰	۱۶	۲۳	E1
۰	۲	۰	۱۶	۱۷	E3
۰	۲	۰	۳۰	۴۱	C3
۰	۱	۱	۱۷	۴۳	B2

## ۶- نتیجه گیری

در خرابی پیشرونده از شاخص حساسیت برای تعیین بحرانی‌ترین ستون استفاده می‌گردد. مقدار این پارامتر به ظرفیت باربری کلی سازه قبل و بعد از حذف ستون بستگی دارد. در موقعیت‌های مختلف حذف ستون، مقدار شاخص حساسیت محاسبه شده و هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، المان مربوط به آن موقعیت المان کلیدی بوده و آن موقعیت بحرانی‌ترین حالت در خرابی پیشرونده خواهد بود. در این مقاله نتایج بدست آمده از تحلیل سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه نشانگر آن است که، سازه‌های فولادی دارای پلان L شکل در نتیجه حذف ستون مرکزی، 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.

مقایسه مقادیر شاخص حساسیت بر اساس نسبت ابعادی کل، نشان می‌دهند مقادیر این شاخص در بیشترین نسبت ابعادی کل دارای بیشترین مقدار است. به عبارت بهتر، در سازه‌هایی با ارتفاع بیشتر، حذف ستون می‌تواند شرایط بحرانی‌تری از نظر خرابی پیشرونده به وجود آورد.

## مراجع

- [1] Ferahian, R. H.; "Buildings: Design for Prevention of Progressive Collapse"; Civil Engineering- ASCE, February, (1972) 66-69
- [2] Kim, J. and Kim, T.; "Assessment of Progressive Collapse-Resisting Capacity of Steel Moment Frames"; *Journal of Constructional Steel Research*, 65, (2009) 169-179.
- [3] Wibowo, H.; "Modeling Progressive Collapse of RC Bridges during Earthquakes"; *CSE Annual General Conference* (2009).
- [4] Wibowo, H. and Lau, D.T.; "Seismic Progressive Collapse Qualitative Point of View"; *Civil Engineering Dimension*, 11(1), (2009) 8-14.
- [5] Kapil, K. and El-Tawil, S.; "Progressive Collapse Analysis of Seismically Designed Steel Braced Frames"; *Journal of Constructional Steel Research*, 65, (2009) 699-708.
- [6] Mashhadiali, N. and Kheyroddin, A.; "Progressive Collapse Assessment of New Hexagrid Structural System for Tall Buildings"; *Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 23, No. 12 (2014) 947-961.
- [7] مهرابی، ف.، خیرالدین، ع. و گرامی، م.؛ «ارزیابی پتانسیل خرابی پیشرونده در ساختمان‌های فولادی طرح‌شده براساس آیین‌نامه‌ی ایران»؛ مهندسی عمران؛ شماره ۴؛ ۱۳۹۱؛ صفحه ۶۵ تا ۷۲
- [8] Kim, J. and Hong, S.; "Progressive Collapse Performance of Irregular Buildings"; *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20, (2012) 721-734.
- [9] Astaneh-Asl, A.; "Progressive Collapse Prevention in New and Existing Buildings"; Proceedings, 9th Arab Structural Engineering Conference, United Arab Emirates (2003).
- [10] Astaneh-Asl, A., Jones, B., Zhao, Y., and Hwa, R.; "Progressive Collapse Resistance of Steel Building Floors"; Report number: CB/CEE-STEEL-03, University of California at Berkeley (2002).

- [11] Fragopol, D. M. and Curley J. P.; "Effects of Damage and Redundancy on Structural Reliability"; *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 113(7), (1987) 1533-1549.
- [12] Ito, T., Ohi, K., and Li, Z.; "A Sensitivity Analysis Related to Redundancy on Framed Structures Subjected to Vertical Loads"; *Transactions of Structural and Construction Engineering*, 593, (2005) 145-151.
- [13] Kim, J. and An, D.; "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Steel Moment Frames Considering Catenary Action"; *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18, (2009) 455-465.
- [14] Ito, T. and Fukuyama, T.; "A Potential Strength and Ultimate Behavior of Framed Structures Considering Catenary Effects after Failure Mechanism Formation Subjected to Vertical Load"; *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 59, (2011) 29-38.
- [15] Choi, J. H., Ito, M., and Ohi, K.; "Prevention of Building Structural Collapse Caused by Accidental Events"; *proc. Of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Improvement of Structural Safety for Building Structures*, (2007) 85-98.
- [16] Kwon, K. H., Park, S. R. M. and Kim, J. K.; "Evaluation of Progressive Collapse Resisting Capacity of Tall Building"; *International Journal of High-Rise Buildings*, 1(3), (2012) 229-235.
- [17] Ito, T., Takemura, T.; "Sensitivity Analysis of Redundancy of Regular and Irregular Framed"; *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 3, No. 4 (2014) 297-304.
- [۱۸] خیرالدین، ع. و فلاحزاده، س.؛ «بررسی رفتار قاب های خمشی فولادی در پدیده خرابی پیشرونده»؛ اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران؛ ۱۳۹۳
- [۱۹] مقررات ملی ساختمان؛ «بارهای وارد بر ساختمان»؛ مبحث ششم؛ معاونت امور مسکن و ساختمان؛ وزارت مسکن و شهرسازی؛ ۱۳۹۲
- [۲۰] مقررات ملی ساختمان؛ «طرح و اجرای ساختمانهای فولادی»؛ مبحث دهم؛ معاونت امور مسکن و ساختمان؛ وزارت مسکن و شهرسازی؛ ۱۳۹۲
- [۲۱] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ «طراحی ساختمانها در برابر زلزله»؛ استاندارد ۲۸۰۰؛ ویرایش چهارم؛ ۱۳۹۴
- [22] The U.S. General Service Administrations (GSA); "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Project"; (2003).
- [23] Computers and structures-Inc ; "ETABS2000 Software"; Berkeley, CA (2000).
- [24] FEMA 356; "Pre Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings"; Federal Emergency Management Agency, Washington (DC) (2000).
- [25] Kwon, K., and Kim, J.; "Progressive Collapse and Seismic Performance of Twisted Diagrid Buildings"; *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 3, No. 3 (2014) 223-230.