

### بررسی اثرات نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی در

### خرابی پیش رونده

سینا رضایی<sup>۱</sup>، سامان فتحی کوچه طلا<sup>۲</sup>، علی ناصری<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد سازه، موسسه آموزش عالی پردیسان، مازندران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

۳- دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>تاریخچه</b> دریافت: ۱۷ اسفند ۱۳۹۶ پذیرش: ۲۴ فروردین ۱۳۹۷	در یک دسته بندی کلی می‌توان انواع مختلف نامنظمی سازه در ارتفاع را به دو دسته نامنظمی هندسی و غیرهندسی تقسیم بندی نمود. در نامنظمی هندسی در ارتفاع، ابعاد پلان سازه در ارتفاع تغییرات قابل توجهی می‌یابد. در نامنظمی غیرهندسی در ارتفاع، تغییرات ناگهانی در ویژگیهای دینامیکی سازه شامل جرم، سختی و مقاومت جانبی سازه در طول ارتفاع رخ می‌دهد. خرابی پیش رونده معمولاً به گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه که همانند یک واکنش شیمیایی زنجیره‌ای منجر به فروپاشی جزئی و یا کلی سازه می‌شود، اطلاق می‌گردد. مطالعات صورت گرفته در رابطه با خرابی‌های سیستم‌های سازه‌ای در سال‌های اخیر، اهمیت پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده ناشی از بارگذاری غیرعادی هم‌چون ضربات تصادف، زمین لرزه، انفجار، زلزله و غیره را مشخص می‌سازد. در این تحقیق ابتدا چهار سازه فولادی با سیستم باربر جانبی دوگانه قاب خمشی ویژه و مهاربند هم محور ویژه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در نرم افزار Etabs 2016 طراحی شد سپس با استفاده از آیین نامه استاندارد مدیریت تعمیرات کلی ایالات متحده و انتخاب روش مسیر جایگزین انتقال بار، سازه‌های مذکور در نرم افزار OpenSEES به صورت ۳ بعدی مدلسازی شده و با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به بررسی اثرات نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی در خرابی پیش رونده پرداخته شده است. پس از بررسی کردن نتایج تحلیل مشاهده شد که نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی باعث کاهش شاخص تنومندی و پایداری سازه شده و مقاومت سازه در برابر خرابی پیش رونده را کاهش می‌دهد.
<b>کلید واژگان:</b> نامنظمی خرابی پیش رونده سازه‌های فولادی دوگانه رفتار لرزه‌ای	



## ۱- مقدمه

خرابی پیش رونده مطابق با استاندارد مدیریت تعمیرات کلی ایالات متحده [۱] به صورت " موقعیتی که خرابی موضعی یک مولفه اولیه سازه‌ای منجر به انهدام اعضای متصل به آن و در نتیجه انهدام اضافی شود توجه شود که خرابی کلی، نسبت به علت اولیه نامتجانس است." تعریف می‌شود. خرابی پیش رونده به ندرت اتفاق می‌افتد، با این حال وقوع آن می‌تواند منجر به خسارات مالی و جانی زیادی گردد. خرابی پیش‌رونده یک حادثه نادر است که در طی آن، همه یا قسمت بزرگی از سازه به علت آسیب یا گسیختگی موضعی قسمت کوچکی از سازه به صورت ناگهانی خراب می‌گردد. خرابی پیش‌رونده اغلب با علت ایجاد آسیب در تناسب نیست و سازه ممکن است به علت یک حادثه کوچک در معرض خرابی پیش‌رونده قرار گیرد. خطرات احتمالی و بارهای غیر عادی که می‌تواند موجب خرابی پیش‌رونده گردد، شامل این موارد می‌باشند: انفجار، ضربه اتومبیل، آتش سوزی، برخورد هواپیما، خطای طراحی یا ساخت، بارگذاری تصادفی بیش از اندازه بر روی اعضاء و یا خطراتی طبیعی چون زلزله و ... چون احتمال وقوع این خطرات کم است، در طراحی سازه‌ای آنها را در نظر نمی‌گیرند یا با اندازه‌گیری‌های غیر مستقیم به آنها می‌پردازند. اکثر آنها ویژگی کنش طی مدت زمان نسبتاً کوتاه را دارند و به پاسخ‌های دینامیکی می‌انجامند.

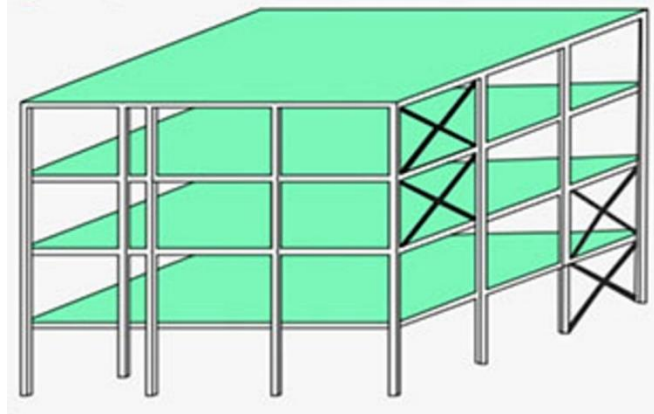
نیروی زلزله می‌تواند نیروهای جانبی و تنش‌های پر قدرتی را ناشی شود، تاثیر این بار می‌تواند اعضای سازه‌ای را بیش از حد، بارگذاری نماید که در نهایت به از دست رفتن یک یا چند عضو باربر منجر شود و امکان دارد که باعث خرابی اعضای سازه‌ای بیشتری شود. مشاهده خسارات زلزله در زمین لرزه‌های گذشته نشان می‌دهد که بارهای لرزه‌ای می‌تواند سبب خساراتی شود که باعث از دست رفتن تکیه‌گاهها شود و خرابی اولیه المان‌های سازه‌ای می‌تواند به دیگر اعضای باربر در مسیرهای مختلف گسترش یابد [۲]. این پدیده همچنین می‌تواند برای سازه‌های طراحی شده بر اساس آئین نامه‌های جاری، حین رخداد زلزله‌های شدید مشکلاتی را بوجود آورد و حتی منجر به ویرانی کل سازه گردد. به عبارت دیگر، هر گونه ضعف در طراحی و یا اجرای المان‌های سازه‌ای ممکن است باعث بوجود آمدن پدیده خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها حین بارگذاری لرزه‌ای نیز گردد. لذا مطالعه و بررسی تاثیر این پدیده در سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد [۳]. نمونه‌هایی از سازه‌هایی که بصورت کلی یا جزئی دچار خرابی پیش‌رونده شده‌اند شامل ۱- رونان پوینت ۲- ساختمان فدرال آلفرد مورا ۳- ساختمان بانکرز تراست ۴- برج الکوبار ۵- برجهای دو قلو تجاری، آمریکا می‌باشند.

مطابق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در صورت وجود یکی از موارد: ۱- نامنظمی هندسی ۲- نامنظمی جرمی ۳- نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی ۴- نامنظمی مقاومت جانبی ۵- نامنظمی سختی جانبی در ارتفاع سازه، ساختمان دارای نامنظمی می‌باشد (در صورتیکه هیچ یک از ۵ مورد شرایط نامنظمی در ارتفاع برقرار نباشد، اصطلاحاً سازه در ارتفاع منظم است) [۴].

بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در مواردی که جزئی از سیستم باربر جانبی در ارتفاع قطع شده باشد، بطوری که آثار ناشی از واژگونی روی تیرها، دالها، ستونها و دیوارهای تکیه‌گاهی تغییراتی ایجاد کند سازه در ارتفاع نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی خواهد داشت [۴].

اگر اجزای باربر در یک قاب از یک دهانه به دهانه دیگر انتقال یابد بطوریکه جابجایی ایجاد شده بیشتر از یک دهانه باشد باعث نامنظمی در ارتفاع (نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی) می‌شود که در شکل شماره ۱۴ قابل مشاهده است [۴].

وقتی نامنظمی در ساختمان وجود داشته باشد اتفاقات زیادی در آن سازه ممکن است رخ دهد که عبارتند از: ۱- غیرقابل پیش‌بینی شدن رفتار زلزله هنگام زلزله ۲- تغییر تحلیل سازه ۳- بوجود آمدن برخی مشکلات اجرایی و طراحی ۴- مشکلات توزیع بار در سازه ۵- بوجود آمدن پیچش در سازه.



شکل ۱. نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی در ارتفاع [۴]

تحقیق بر روی خرابی پیش رونده را می‌توان به دو رویکرد مختلف طبقه بندی کرد: (۱) گسترش سیستمهای سازه ای که مانع از خرابی پیش رونده شود، (۲) ایجاد یک روش تحلیلی مناسب و کارآمد [۵]. استاروسک در سال ۲۰۰۶، عبارتهای «robustness» و «collapse resistance» که تعاریف مهمی در مبحث خرابی پیش رونده می‌باشند را مورد بررسی قرار داده است. Robustness: فقط مربوط به خصوصیت سازه می‌باشد و مستقل از علت اولیه گسیختگی موضعی است. Collapse resistance: این خصوصیت تحت تأثیر عوامل متعدد شامل خصوصیات سازه‌ای و عوامل ایجاد خرابی اولیه می‌باشد [۶].

کپیل کاندلوال و شریف تاویل در سال ۲۰۰۹ خرابی پیش رونده در قاب های مهاربندی شده فولادی طراحی شده بر اساس معیار های لرزه ای را مورد بررسی قرار دادند. مدل های دو بعدی ده طبقه از قاب های مهاربندی شده محبوب شامل SCBF و EBF استفاده گردید و با استفاده روش APM مقاومت در برابر خرابی پیشرونده این قاب ها مقایسه گردید. شبیه سازی ها نشان داد که قابهای مهاربندی با سیستم EBF که برای خطر لرزه ای زیاد طراحی شده اند نسبت به سیستم SCBF طراحی شده برای خطر لرزه ای متوسط نسبت به خرابی پیشرونده ایجاد شده بر اثر بار ثقلی کمتر آسیب می پذیرند. استنباط شد که این امر دنباله شکل پذیری مناسب تر سیستم EBF می باشد [۷].

فنگ فو در سال ۲۰۱۰ رفتار یک ساختمان کامپوزیت فولادی ۲۰ طبقه بصورت سه بعدی تحت سناریوی حذف ستون با نرم افزار آباکوس بررسی کرد. مطالعات پارامتریک بر اساس تغییر مقاومت بتن، مقاومت فولاد سازه ای و فاصله مش ها انجام شد. نتایج نشان داد که سناریوی حذف یک ستون محتمل ترین حادثه است. بنابراین اکثر تحقیقات انجام شده روی حذف یک ستون متمرکز شده اند. سطح مقطع مش ها تاثیر ناچیزی در رفتار سازه داشت ولی افزایش فاصله مش ها تغییر شکل را افزایش داد [۸].

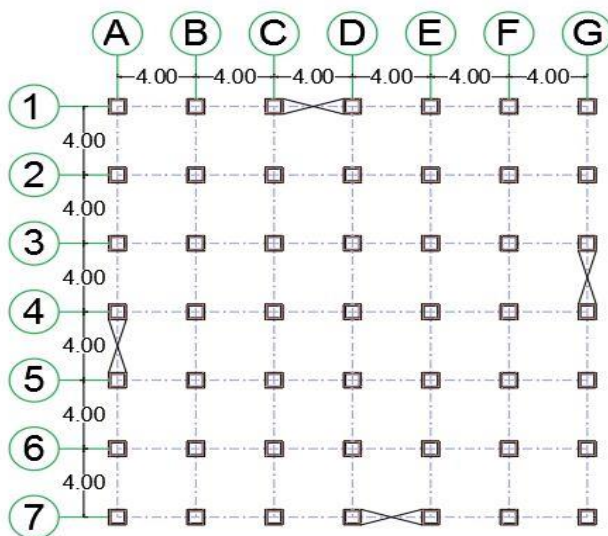
در سال ۱۳۹۴ واثقی امیری و همکاران به بررسی بحرانی ترین حالت حذف ستون بر روی خرابی پیش رونده در سازه های فولادی دوگانه قاب خمشی متوسط و مهاربند هم محور ویژه پرداختند. در این تحقیق پس از مدل سازی ۳ بعدی ۳ سازه فولادی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم باربر جانبی دوگانه قاب خمشی متوسط و مهاربند هم محور ویژه در نرم افزار OpenSEES و بارگذاری های مربوط به خرابی پیش رونده مطابق با آیین نامه GSA و استفاده از مسیر جایگزین انتقال بار، سازه ها را مورد ارزیابی قرار داده و با انجام تحلیل های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیر خطی بحرانی ترین نتایج خرابی حاصل از حذف ستون بر روی سازه ها را مشخص نمودند و به این نتیجه رسیدند که بحرانی ترین حالت حذف ستون تنها، حذف ستون کناری و بحرانی ترین حالت حذف ستون همراه با مهاربندهای متصل به آن حذف ستون کناری و مهاربندهای متصل به آن می باشد [۹].

## ۲- مشخصات مدل های بررسی شده

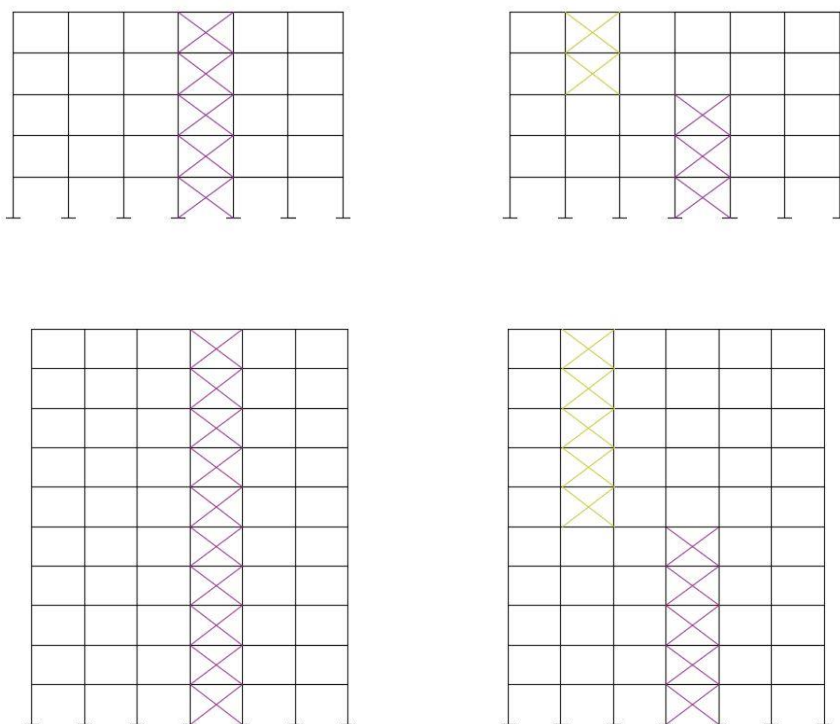
سازه‌های مورد بررسی، سازه‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه هستند که به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده‌اند. سازه‌های ذکر شده دارای سیستم باربر جانبی از نوع سیستم دوگانه قاب خمشی ویژه و مهاربند همگرای ویژه می‌باشند. طراحی سازه‌ها با استفاده از نرم افزار ایتبس ۲۰۱۶ و بر اساس روش حالات حدی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان انجام شده است [۱۰]. آیین نامه انتخاب شده جهت طراحی سازه‌ها در نرم افزار ایتبس ۲۰۱۶ آیین نامه AISC-360-10 می‌باشد. نیروی زلزله بر اساس روش دینامیکی طیفی (طیف طرح استاندارد) موجود در استاندارد ۲۸۰۰ بدست آمده است [۱۱]. ساختمان‌ها از نوع مسکونی با اهمیت متوسط فرض شده‌اند. منطقه مورد مطالعه با لرزه خیزی زیاد و خاک از نوع III در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقات یکسان و برابر ۳ متر می‌باشد. سیستم سقف از نوع تیرچه های فلزی با جان باز (کرمیت) می‌باشد. مقاطع مورد استفاده در تیرها از نوع مقاطع IPE و یا تیر ورق بوده و ستون‌ها از نوع Box بوده و مهاربند‌ها از نوع 2UNP می‌باشد. فولاد مصرفی از نوع ST37 با حداقل تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر-مربع استفاده شده است. برای محاسبه وزن هر طبقه در هنگام زلزله کل بار مرده و ۲۰ درصد از بار زنده لحاظ شده است. بارگذاری ثقلی بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان انجام شده است [۱۲] که در جدول شماره ۱ ارائه شده است. پلان و محل قرارگیری مهاربند‌ها برای هر ۳ سازه یکسان بوده که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. در شکل شماره ۳ نمای قاب‌های دارای مهاربند سازه ۵ و ۱۰ طبقه در حالت منظم و نامنظم در ارتفاع نشان داده شده است.

جدول ۱. بارگذاری ثقلی جهت طراحی سازه

ردیف	عنوان بارگذاری	بار مرده ( $\text{kg} / \text{m}^2$ )	بار زنده ( $\text{kg} / \text{m}^2$ )	بار معادل تیغه ها ( $\text{kg} / \text{m}^2$ )
۱	سقف طبقات	۵۲۰	۲۰۰	۱۱۵
۲	سقف بام	۵۷۰	۱۵۰	-----
۳	رمپ راه پله	۵۱۰	۵۰۰	-----
۴	پاگرد راه پله	۴۳۵	۵۰۰	-----
۵	دیوار جانبی بدون نما	۶۰۰	-----	-----
۶	دیوار جانبی نما دار	۵۳۰	-----	-----
۷	دیوار جان پناه	۲۵۱	-----	-----



شکل ۲. پلان و محل قرارگیری مهاربندها



شکل ۳. نمای قاب‌های دارای مهاربند در سازه ۵ و ۱۰ طبقه در حالت منظم و نامنظم در ارتفاع

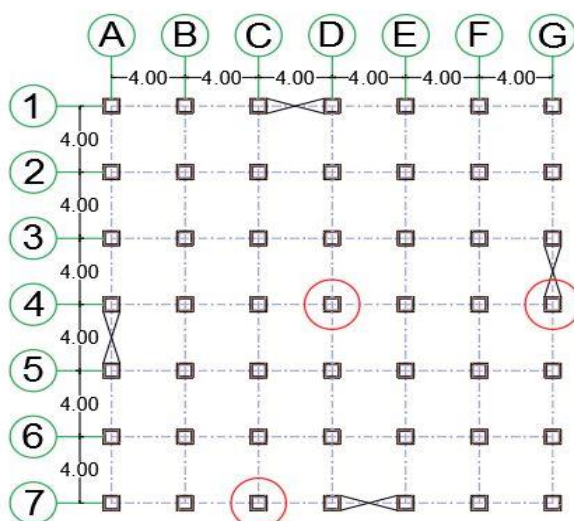
### ۳- تحلیل دینامیکی غیر خطی

هنگامی که یک سازه تحت اثر زلزله دچار خرابی موضعی می‌گردد، پاسخ سازه بوسیله اثرات دینامیکی تاثیر می‌گیرد. بنا به همین دلیل باید رفتار دینامیکی سازه در تحلیل‌های مربوط به خرابی پیش‌رونده در نظر گرفته شود. رفتار سازه و مولفه‌های آن قبل از رسیدن به شرایط انهدام باید از حالت الاستیک خارج شده و وارد رفتار غیر خطی شود. بنابراین تحلیل دینامیکی غیر خطی بعنوان روشی دقیق مد

نظر قرار میگیرد. جهت بررسی کردن اثرات نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی در خرابی پیش رونده تحت اثر زلزله از تحلیل دینامیکی غیر خطی (تحلیل تاریخچه زمانی) استفاده شده است. در این روش پس از مدلسازی ۳ بعدی سازه‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در نرم افزار اپنسیس، ترکیب بار ثقلی، به مدل‌ها اعمال شده و تحت شتاب نگاشت‌های مقیاس شده تحلیل تاریخچه زمانی صورت گرفته است و برش پایه سازه در دو حالت بدون خرابی موضعی (سازه سالم) و با خرابی موضعی (سازه با حذف ستون) در هر کدام از سازه‌های منظم در ارتفاع و نامنظم در ارتفاع بدست آمده و شاخص تنومندی محاسبه شده است. روال انجام تحلیل در سازه با خرابی موضعی بدین صورت است که ابتدا سازه تحت هر کدام از شتاب نگاشت‌ها، مورد تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفته و در زمان اوج زلزله ستون مورد نظر حذف شده است. یعنی فرض بر این است که سازه در زمان اوج زلزله دچار خرابی شده است.

### ۱-۳ حالات حذف ستون

حالات حذف ستون بر اساس آیین نامه استاندارد مدیریت تعمیرات کلی ایالات متحده مطابق با شکل شماره ۴ انتخاب شده است. سناریوی حذف ستون در این بررسی بدین صورت است که ستون در زمان اوج زلزله حذف شده. کلیه ستون‌های حذف شده واقع در طبقه همکف می‌باشند. جهت بررسی خرابی پیش رونده در سازه‌های فولادی مجموعاً ۳ سناریوی حذف ستون که شامل: ۲ حالت حذف ستون و ۱ حالت حذف ستون همراه با مهاربندهای متصل به آن می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل ۴. حالات حذف ستون

### ۲-۳ معرفی بارهای ثقلی وارده

مطابق با آیین نامه استاندارد مدیریت تعمیرات کلی ایالات متحده بارهای ثقلی اعمالی به سازه جهت انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی مربوط به خرابی پیش رونده  $DL+0.25LL$  بوده که در هر دو حالت سازه با خرابی موضعی و سازه بدون خرابی موضعی در سازه‌های منظم در ارتفاع و سازه‌های دارای نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی این ترکیب بار ثابت بوده است.

## ۳-۳ معرفی شتابنگاشت های مورد استفاده

جهت انجام دادن تحلیل های دینامیکی غیر خطی ( تاریخچه زمانی ) برای بررسی اثرات نامنظمی قطع سیستم بابر جانبی بر رفتار لرزه ای سازه های فولادی در خرابی پیش رونده از ۳ شتاب نگاشت دور از گسل از مجموعه رکوردهای استاندارد دور از گسل آیین نامه FEMA P695 انتخاب گردید. در جدول شماره ۲ جزئیات و مشخصات شتابنگاشت های مورد استفاده نشان داده شده است. در انتخاب شتاب نگاشت ها سعی شده شتابنگاشت ها تا حد امکان دارای ویژگی های مشترکی باشند.

جدول ۲. مشخصات شتاب نگاشت ها

ردیف	نام زلزله	سال زلزله	بزرگای زلزله	فاصله از گسل	نوع خاک NEHRP	زمان زلزله	نام ایستگاه رکورد زلزله	سرعت موج برشی	PGA.g X	PGA.g Y	PGV max
1	Northridge	1994	6.7	13.3 Km	D	29.99	Beverly Hills - Mulhol	356	0.42	0.52	63
۲	Kobe , Japan	1995	6.9	46 Km	D	40.96	Shin - Osaka	256	0.24	0.21	38
۳	San Fernando	1971	6.6	20.2 Km	D	28	LA - Hollywood Stor	316	0.17	0.21	19

## ۴-۳ مقیاس کردن شتابنگاشت ها

شتابنگاشت ها طبق روش مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ و با استفاده از نرم افزار سیسمو سیگنال مقیاس شده اند.

- کلیه شتابنگاشت ها به مقدار حداکثر خود مقیاس شده اند. بدین معنی که حداکثر شتاب همه آنها برابر با شتاب ثقل (g) شده است.
- طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتابنگاشت های اصلاح شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵٪ تعیین گردیده است.
- طیف های پاسخ هر زوج شتابنگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شده است.
- طیف های پاسخ ترکیبی ۳ زوج شتاب نگاشت، ماکسیمم گیری شده و در محدوده زمانها تناوب T ۰/۲ تا T ۱/۵ با طیف طرح استاندارد مقایسه گردیده. ( T زمان تناوب اصلی ساختمان است )
- ضریب مقیاس آنچنان تعیین گردید که در این محدوده مقادیر متوسط ها در هیچ حالت کمتر از ۱/۳ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد.

باتوجه به توضیحات داده شده در خصوص مقیاس کردن شتاب نگاشت ها مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ضریب مقیاس هر رکورد بصورت ضریبی از شتاب ثقل در جدول شماره ۳ ارائه شده است. در شکل شماره ۵ طیف پاسخ حداکثر ۳ شتاب نگاشت ترکیبی نشان داده شده است. جهت استفاده کردن از این ضرایب در نرم افزار، مقادیر بدست آمده را بر حداکثر مقدار مطلق PGA تقسیم و در g ضرب می کنیم.

جدول ۳. مقادیر ضرایب مقیاس شتاب نگاشت ها

سازه مورد نظر	ضریب مقیاس
۵ طبقه	۰/۲۵۱
۱۰ طبقه	۰/۵۱۶
۱۵ طبقه	۰/۷۴۴
۲۰ طبقه	۰/۹۸۲



شکل ۵. طیف پاسخ حداکثر ۳ شتاب نگاشت ترکیبی با میرایی ۵٪

### ۳-۵ شاخص تنومندی

تنومندی بعنوان عدم حساسیت نسبت به یک خرابی موضعی تعریف شده است. به عبارت دیگر، تنومندی سازه، سر پا ماندن در هنگام وقوع یک خرابی موضعی است. یک سازه تنومند میتواند در مقابل بارگذاری بایستد بدون اینکه سبب هیچ خرابی نامتجانسی شود. به منظور بهتر طبقه بندی کردن نتایج، شاخصی از تنومندی را تعریف میکنیم. اگر بار طراحی در سازه سالم و آسیب دیده یکسان باشد، R میتواند بصورت زیر نوشته شود [۶]:

$$R = \frac{V_{(damaged)}}{V_{(intact)}}$$

$V_{damaged}$ : برش پایه سازه با خرابی موضعی و  $V_{intact}$ : برش پایه سازه بدون خرابی موضعی.

### ۳-۶ فرضیات و نحوه مدلسازی در نرم افزار اپنسیس

جهت بررسی عملکرد لرزه ای سازه های فولادی در برابر خرابی پیش رونده از نرم افزار اپنسیس استفاده شده است. مدلسازی سازه ها به صورت ۳ بعدی انجام شده است. جهت مدلسازی از مصالح، المانها و فرضیاتی به شرح ذیل استفاده شده است:

- مصالح مورد استفاده از نوع مصالح فولادی Steel 02 بوده. این نوع مصالح برای ساخت مصالح فولادی با سخت شوندگی ایزوتروپیک به کار برده می شود. در تعریف این مصالح از پارامترهای آورده شده در جدول شماره ۴ استفاده شده است.



- برای ساخت مقاطع از دستور **Fiber Section** استفاده شده است. این مقطع یک شکل هندسی عمومی دارد که از نواحی با اشکال ساده تر و منظم تر مانند نواحی مستطیلی، دایره ای و و مثلثی تشکیل شده است. پس از ساخت مقاطع، برای اینکه سازه در پیچش ناپایدار نباشد، مصالحی را از جنس پیچش ساخته و با استفاده از دستور **Section Aggregator** رفتار تحت پیچش به مقاطع ساخته شده اختصاص داده شده است.
- برای مقید کردن گره های متصل به زمین ( تکیه گاه های سازه ) از دستور **Fix** استفاده نموده و گره های ذکر شده در ۶ جهت ( ۳ جهت انتقالی و ۳ جهت دورانی ) مقید شده اند.
- برای ایجاد دیافراگم صلب ابتدا گرهی را با مختصات مرکز جرم طبقه تعریف کرده و سپس آن گره را با توجه به درجات آزادی و انتقالی دیافراگم مقید نموده و سپس کلیه گره های موجود در آن طبقه را با استفاده از دستور **Rigid Diaphragm** به گره مرکز جرم وابسته کرده و آنها را تبدیل به دیافراگم صلب کرده.
- برای اختصاص جرم سازه با استفاده از دستور **mass** جرم هر طبقه را در ۳ راستا ( ۲ راستا انتقالی و ۱ راستا دورانی ) به گره مرکز جرم آن طبقه وارد نموده. اختصاص جرم به سازه زمانی مورد نیاز است که تحلیل دینامیکی و مودال مورد نظر باشد.
- جهت تعریف کردن المان های تیر و ستون از المان تیر ستون غیر خطی و جهت تعریف کردن المان های مهاربند از المان خرابایی استفاده شده است.

#### جدول ۴. مشخصات مصالح Steel 02

تنش تسلیم	Fy	$2.353 \times 10^8$ N/m <sup>2</sup>
مدول الاستیسیته اولیه	E	$2 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>
نسبت سخت شوندگی کرنشی	b	0.01
پارامتر انتقال از شاخه الاستیک به پلاستیک	R <sub>0</sub>	18.5
پارامتر انتقال از شاخه الاستیک به پلاستیک	R <sub>1</sub>	0.925
پارامتر انتقال از شاخه الاستیک به پلاستیک	R <sub>2</sub>	0.15
پارامتر سخت شوندگی ایزو تروپیک	a <sub>1</sub>	0.0005
پارامتر سخت شوندگی ایزو تروپیک	a <sub>2</sub>	0.01
پارامتر سخت شوندگی ایزو تروپیک	a <sub>3</sub>	0.0005
پارامتر سخت شوندگی ایزو تروپیک	a <sub>4</sub>	0.01

#### ۴- بررسی نتایج تحلیل های دینامیکی غیر خطی مربوط به خرابی پیش رونده

پس از اعمال بارگذاری های ثقلی مربوط به خرابی پیش رونده مطابق با آیین نامه استاندارد مدیریت تعمیرات کلی ایالات متحده بر روی سازه های مذکور و اعمال شتاب نگاشت های مقیاس شده به سازه ها در هر دو راستا، تحلیل های دینامیکی غیر خطی جهت بررسی خرابی پیش رونده بر روی سازه های مدل سازی شده به صورت ۳ بعدی در نرم افزار اپنسیس انجام شده است به گونه ای که ابتدا سازه های منظم در ارتفاع را در حالت بدون خرابی موضعی تحت ۳ شتاب نگاشت مقیاس شده مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار داده و سپس از مقادیر برش پایه به دست آمده برای هر سازه تحت هر شتاب نگاشت ماکسیمم گرفته شده و مقدار حداکثر برش پایه ملاک کار قرار داده شده است. سپس ستون مورد نظر را در زمان مشخص شده در سازه های منظم در ارتفاع حذف نموده ( فرض بر این است که

سازه در حین زلزله دچار خرابی گردیده است) و سازه تحت هر کدام از ۳ شتاب نگاشت مقیاس شده تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی شد و از ۳ برش پایه بدست آمده برای هر حالت حذف ستون ماکسیمم گرفته شده و حداکثر برش پایه ملاک قرار داده شده است، با تقسیم کردن مقدار برش پایه سازه با خرابی موضعی به برش پایه سازه بدون خرابی موضعی مقدار شاخص تنومندی برای هر حالت حذف ستون در سازه های منظم در ارتفاع محاسبه شده است. کلیه مراحل گفته شده در بالا را برای سازه های دارای نامنظمی در سیستم باربر جانبی تکرار نموده و مقادیر شاخص تنومندی را برای هر کدام از حالات حذف ستون محاسبه می‌نمائیم. کلیه حالات حذف ستون در تحلیل دینامیکی غیر خطی در طبقه همکف بوده است. در جدول شماره ۵ حداکثر مقادیر شاخص تنومندی حاصل از تحلیل های دینامیکی غیرخطی تحت ۳ شتاب نگاشت مقیاس شده آورده شده است. در شکل های شماره ۶ نمودارهای شاخص تنومندی برای حالات منظم در ارتفاع و نامنظم در ارتفاع نشان داده شده است.

#### جدول ۵. حداکثر مقادیر شاخص تنومندی حالات مختلف حذف ستون تحت تحلیل های دینامیکی غیرخطی

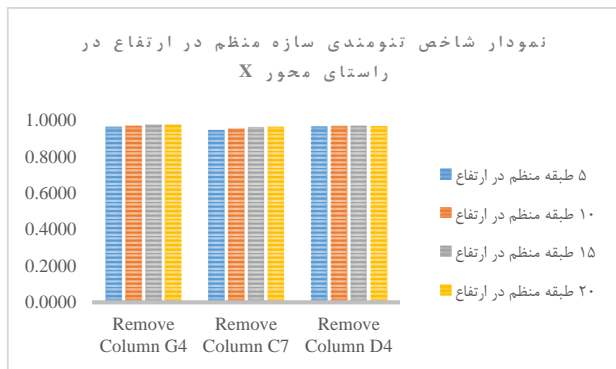
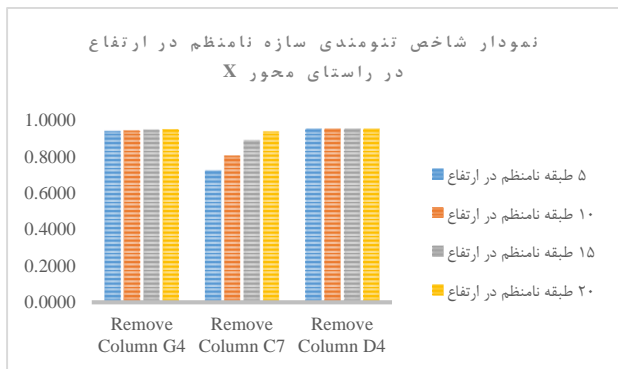
##### الف) در راستای محور X

شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
0.9474	0.9782	0.9456	0.9737	0.9424	0.9692	0.9393	0.9648	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری)
0.9376	0.9657	0.8880	0.9594	0.8053	0.9532	0.7226	0.9469	ستون C7 (ستون کناری)
0.9517	0.9693	0.9515	0.9683	0.9513	0.9674	0.9511	0.9664	ستون D4 (ستون میانی)

##### ب) در راستای محور Y

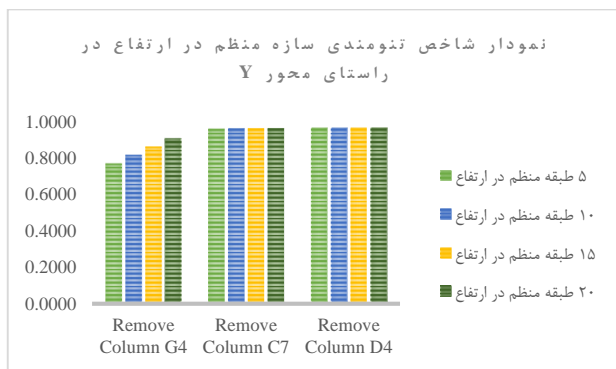
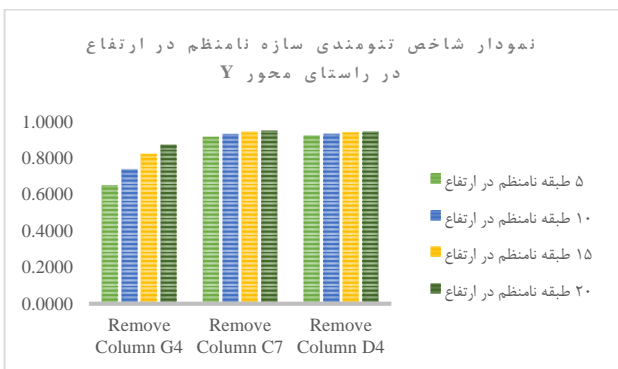
شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
0.8743	0.9095	0.8227	0.8631	0.7367	0.8168	0.6507	0.7704	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری)
0.9507	0.9651	0.9431	0.9632	0.9303	0.9613	0.9176	0.9594	ستون C7 (ستون کناری)
0.9450	0.9678	0.9401	0.9666	0.9319	0.9655	0.9237	0.9643	ستون D4 (ستون میانی)





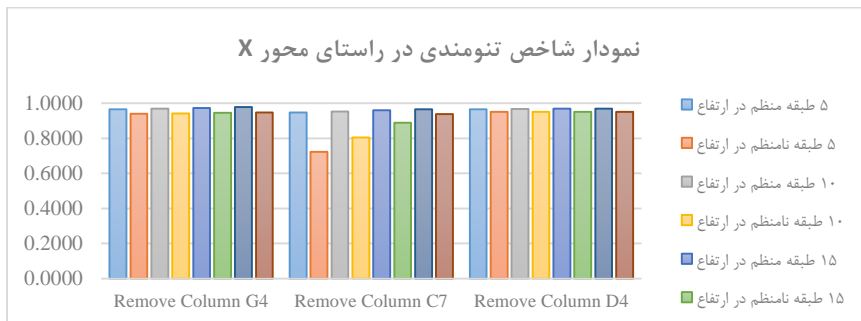
ب) شاخص تنومندی سازه‌های نامنظم در ارتفاع در راستای محور X

الف) شاخص تنومندی سازه‌های منظم در ارتفاع در راستای محور X

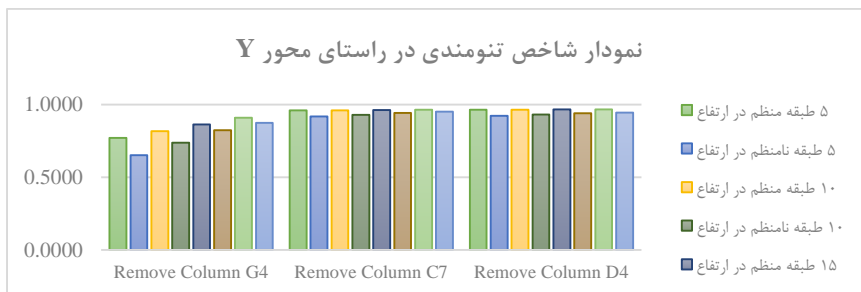


ت) شاخص تنومندی سازه‌های نامنظم در ارتفاع در راستای محور Y

پ) شاخص تنومندی سازه‌های منظم در ارتفاع در راستای محور Y



ث) شاخص تنومندی سازه‌های منظم و نامنظم در ارتفاع در راستای محور X



ج) شاخص تنومندی سازه‌های منظم و نامنظم در ارتفاع در راستای محور Y

شکل ۶. مقادیر شاخص تنومندی برای سازه‌های منظم در ارتفاع و دارای نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی



## ۴-۱ بررسی بحرانی ترین حالت حذف ستون

با توجه به مقادیر شاخص تنومندی بدست آمده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، در این قسمت به بررسی بحرانی ترین حالت حذف ستون تنها و حذف ستون همراه با مهاربند در پدیده خرابی پیش رونده پرداخته شده است. پس از بررسی نتایج مشاهده شد که حذف ستون کناری بحرانی ترین حالت حذف ستون تنها را در هر ۴ سازه (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه) بوجود آورده است. بحرانی ترین حالت در سناریو های مختلف حذف ستون برای هر ۴ سازه حالت حذف ستون کناری همراه با مهاربندهای متصل به آن است. حذف ستون های کناری نتایج بحرانی تری را نسبت به حذف ستون میانی بوجود آورده است.

در جدول شماره ۶ بحرانی ترین مقادیر شاخص تنومندی حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در حالت حذف ستون تنها و حذف ستون همراه با مهاربند آورده شده است، در جدول شماره ۷ درصد کاهش شاخص تنومندی برای بحرانی ترین حالات حذف ستون تنها و با مهاربند تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی آورده شده است.

در شکل شماره ۷ نمودار بحرانی ترین مقادیر شاخص تنومندی تحت تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان داده شده است.

## جدول ۶. بحرانی ترین مقادیر شاخص تنومندی تحت تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی

الف) بحرانی ترین مقادیر شاخص تنومندی در حالات حذف ستون تنها و حذف ستون همراه با مهاربندهای متصل به آن در راستای محور X

شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
0.9376	0.9657	0.8880	0.9594	0.8053	0.9532	0.7226	0.9469	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری) ستون C7 (ستون کناری) ستون D4 (ستون میانی)

ب) بحرانی ترین مقادیر شاخص تنومندی در حالات حذف ستون تنها و حذف ستون همراه با مهاربندهای متصل به آن در راستای محور Y

شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
0.8743	0.9095	0.8227	0.8631	0.7367	0.8168	0.6507	0.7704	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری) ستون C7 (ستون کناری) ستون D4 (ستون میانی)

ج) بحرانی ترین مقادیر شاخص تنومندی در سازه‌های مختلف در هر دو راستا

شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
0.8743	0.9095	0.8227	0.8631	0.7367	0.8168	0.6507	0.7704	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری)

شکل ۷. درصد کاهش شاخص تنومندی تحت تحلیل های دینامیکی غیرخطی

الف) درصد کاهش شاخص تنومندی در حالات حذف ستون تنها و حذف ستون همراه با مهاربندهای متصل به آن در راستای محور X

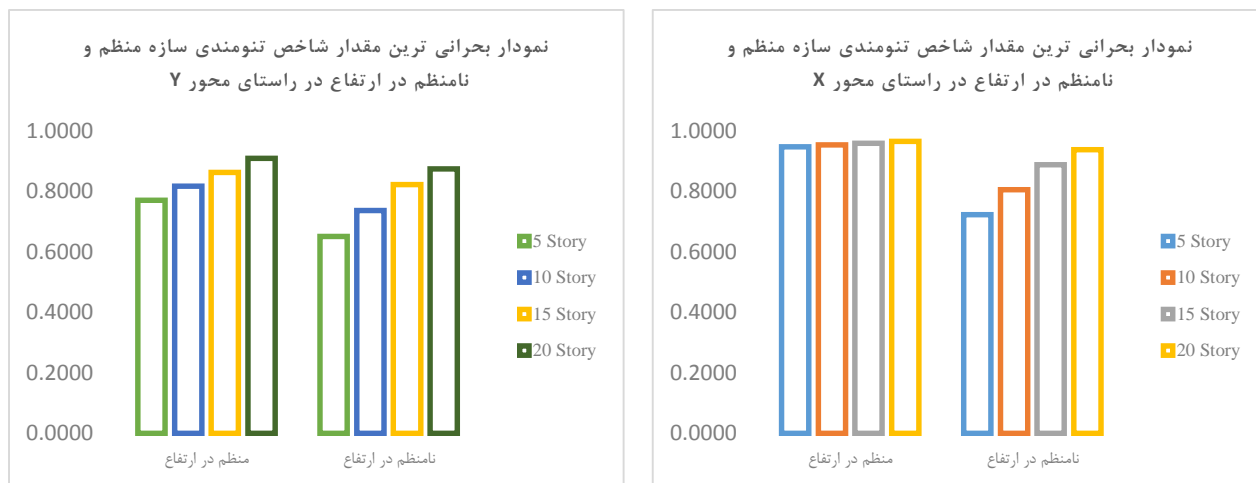
شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
6.24%	3.43%	11.20%	4.06%	19.47%	4.68%	27.74%	5.31%	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری) ستون C7 (ستون کناری) ستون D4 (ستون میانی)

ب) درصد کاهش شاخص تنومندی در حالات حذف ستون تنها و حذف ستون همراه با مهاربندهای متصل به آن در راستای محور Y

شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
12.57%	9.05%	17.73%	13.69%	26.33%	18.32%	34.93%	22.96%	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری) ستون C7 (ستون کناری) ستون D4 (ستون میانی)

ج) درصد کاهش شاخص تنومندی برای بحرانی ترین حالت حذف ستون تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی در هر دو راستا

شاخص تنومندی								حالات حذف ستون
سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۵ طبقه		
نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	نامنظم در ارتفاع	منظم در ارتفاع	
12.57%	9.05%	17.73%	13.69%	26.33%	18.32%	34.93%	22.96%	ستون G4 و مهاربندهای آن (ستون کناری)



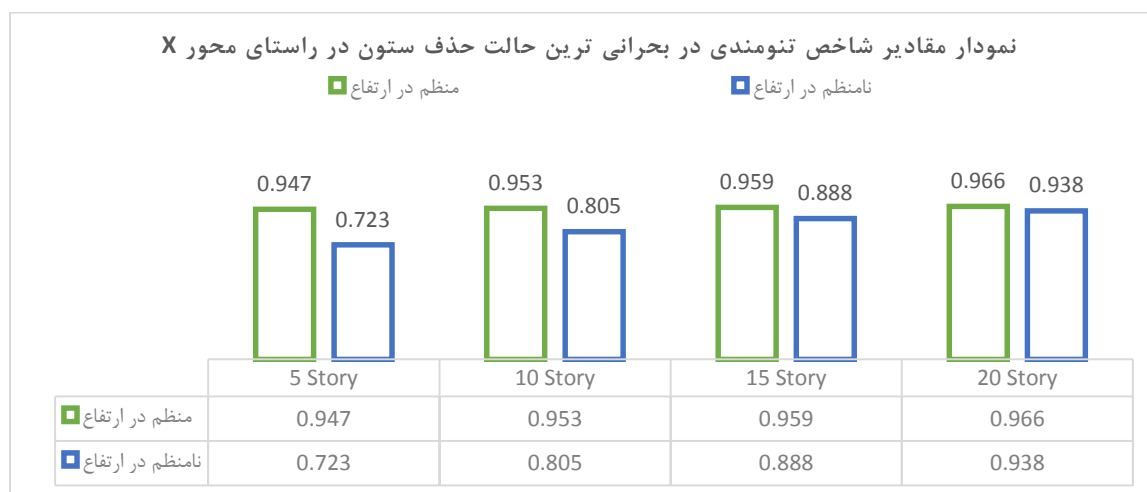
شکل ۷. بحرانی ترین مقادیر شاخص تنومندی تحت تحلیل های دینامیکی غیرخطی برای سازه های منظم در ارتفاع و دارای نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی

#### ۲-۴- بررسی اثرات نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی بر روی خرابی پیش رونده

در این قسمت به بررسی اثرات نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی بر روی خرابی پیش رونده پرداخته شده است. با توجه به جداول شماره ۵ و همچنین نمودارهای شماره ۶ مشاهده شد که در تمامی حالات حذف ستون، شاخص تنومندی سازه های دارای نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی کمتر از شاخص تنومندی سازه های منظم در ارتفاع بوده و ظرفیت و مقاومت سازه های دارای نامنظمی در ارتفاع در برابر خرابی پیش رونده کمتر از سازه های منظم در ارتفاع می باشد.

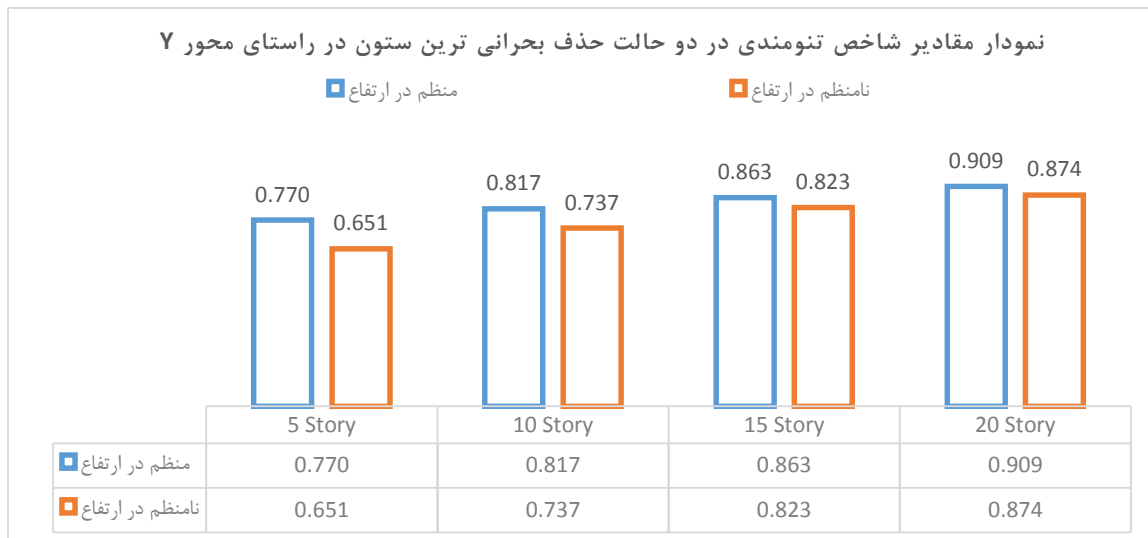
همچنین نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی غیرخطی مربوط به خرابی پیش رونده نشان می دهند که با افزایش ارتفاع سازه اثرات نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی کمتر شده و سازه های با ارتفاع بیشتر و دارای نامنظمی در ارتفاع کمتر از سازه های کوتاه در برابر خرابی پیش رونده دچار آسیب می شوند.

در شکل شماره ۸ نمودار مقادیر شاخص تنومندی در بحرانی ترین حالت حذف ستون نمایش داده شده است. در شکل شماره ۹ نمودارهای درصد کاهش مقاومت سازه در برابر خرابی پیش رونده در بحرانی ترین حالت حذف ستون نشان داده شده است.



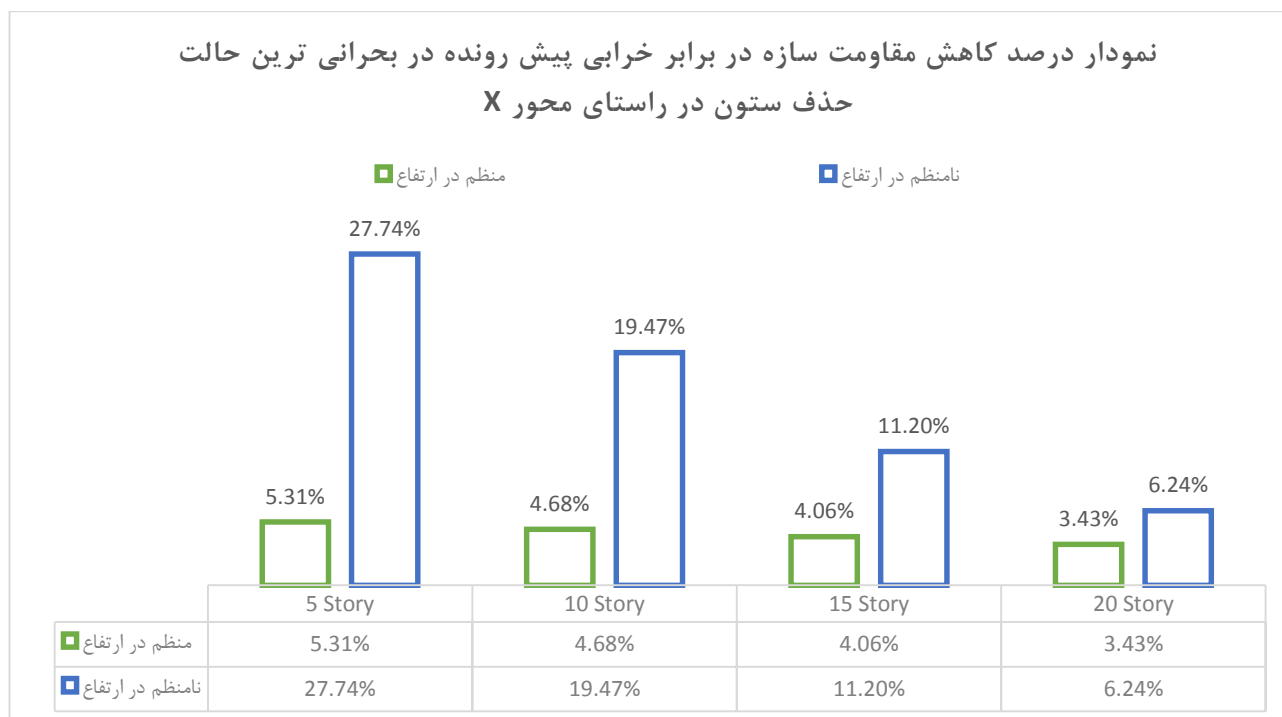
الف) نمودار مقادیر شاخص تنومندی در بحرانی ترین حالت حذف ستون در راستای محور X





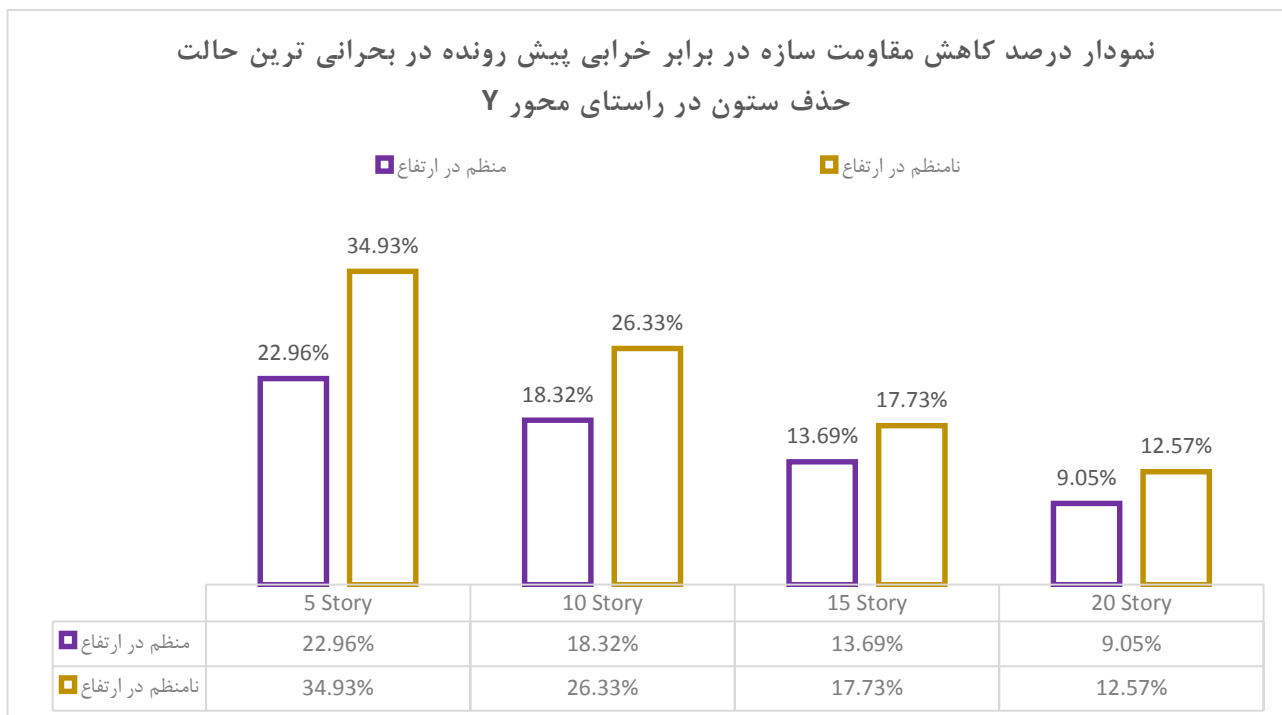
ب) نمودار مقادیر شاخص تنومندی در بحرانی ترین حالت حذف ستون در راستای محور Y

شکل ۸. نمودار مقادیر شاخص تنومندی در بحرانی ترین حالت حذف ستون



الف) نمودار درصد کاهش مقاومت سازه در برابر خرابی پیش رونده در بحرانی ترین حالت حذف ستون در راستای محور X





(ب) نمودار درصد کاهش مقاومت سازه در برابر خرابی پیش رونده در بحرانی ترین حالت حذف ستون در راستای محور Y

شکل ۹. نمودار درصد کاهش مقاومت سازه در برابر خرابی پیش رونده در بحرانی ترین حالت حذف ستون

## 5- نتیجه گیری

پس از انجام تحلیل ها و بررسی نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی غیرخطی، نتایج زیر حاصل شد:

- حذف ستون کناری در پدیده خرابی پیش رونده بحرانی ترین حالت حذف ستون تنها را برای سازه بوجود آورده است.
- حذف ستون کناری و مهاربندهای متصل به آن در پدیده خرابی پیش رونده بحرانی ترین حالت حذف ستون همراه با مهاربند را برای سازه بوجود آورده است.
- با افزایش تعداد طبقات سازه، میزان شاخص تنومندی چه در حالت سازه منظم در ارتفاع و چه در حالت نامنظم در ارتفاع با افزایش روبرو بوده است یعنی با افزایش تعداد طبقات، سازه در برابر پدیده خرابی پیش رونده مقاوم تر شده است.
- نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی در کلیه سازه ها و در کلیه حالات حذف ستون باعث کاهش شاخص تنومندی شده است به گونه ای که سازه با نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی در حالت حذف ستون G4 و مهاربندهای متصل به آن ۳۴/۹۳٪ کاهش شاخص تنومندی داشته است.



## مراجع

- [1] GSA. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. The U.S. General Services Administration; 2003.
- [۲] رشیدی الاشتی، علی "تاثیر خرابی های پیش رونده بر عملکرد لرزه ای سازه های ساختمانی فولاد". پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۹۱.
- [۳] اکبریور، سوده "خرابی پیش رونده و تاثیر آن بر عملکرد لرزه ای قابهای خمشی بتن آرمه". پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم و فنون مازندران، ۱۳۸۹.
- [۴] گروه مهندسی فرا عمران.
- [5] J. Kim, J.-H. Park, and T.-H. Lee, "Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss", *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 421-432, 2011.
- [6] Uwe Starossek, Marco Haberland, (2006), "Evaluating Measures of Structural Robustness", ASCE Structures Congress, Austin, Texas, USA .
- [7] Kapil K, El-Tawil S, "Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65 699-708.
- [8] Feng Fu, "3-D nonlinear dynamic progressive collapse analysis of multi-storey steel composite frame buildings - Parametric study, *Engineering Structures*", 2010, 32 3974-3980
- [۹] رضایی، سینا؛ جواد واثقی امیری؛ علی ناصری و سیروس غلامپور، ۱۳۹۴، "بررسی بحرانی ترین حالت حذف ستون بر روی خرابی پیش رونده در سازه های فولادی دوگانه قاب خمشی متوسط و مهاربند هم محور ویژه"، کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی، امارت - دبی، موسسه ایده پرداز پایتخت ویرا،
- [۱۰] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان. طرح و اجرای ساختمانهای فولادی. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی. ۱۳۹۲.
- [۱۱] استاندارد ۲۸۰۰. آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله. مرکز تحقیقات مسکن. ویرایش چهارم. ۱۳۹۳
- [۱۲] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان. بارهای وارده بر ساختمان. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی. ۱۳۹۲.
- [13] National Institute of Standard and Technology (NIST). Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings (Draft), 2006
- [14] Menchel Kfir, Progressive collapse: comparison of main standards, formulation and validation of new computational procedures, PHD thesis, 2009
- [15] H. Wibowo & D.T Lau, Seismic Progressive Collapse Qualitative Point of View, *Civil Engineering Dimension*, 2009 Vol.11.No.1, 8-14
- [16] L.-M. Zhang and X.-L. Liu, "Learning from the Wenchuan earthquake: key problems in collapse analysis of structures," in *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Chinese Association of Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [17] Elkholy Said, Numerical Study of Collapse Behavior of Steel Buildings due to Extremely High Seismic Load, *JSCE*, 2005.
- [18] Telford Thomas, Progressive collapse of structures, CPI Antony Rowe, UK, 2009
- [19] Nielsen Jannie, Probabilistic Analysis of the Robustness of Earthquake resistant Steel Structures, Master thesis, Faculty of engineering, science and medicine, Aalborg University, 2009.
- [20] Lew, H. and Ellingwood, B.R. and Smilowitz, R. and Carino, N., "Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings", 2006.



- [21] Lew, H.s., “Analysis Procedures for Progressive Collaps of Building”, 2007.
- [22] Liu Min, Progressive collapse design of seismic steel frames using structural optimization, Journal of Constructional Steel Research , 2011, 67 322–332.
- [23] FEMA. Quantification of building seismic performance factors. FEMA P695. (June 2009), Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.



---

**Research Paper**

---

**Investigation of the effects of lateral resistance system interruption irregularity on steel structures seismic behavior in progressive collaps**Sina Rezaei<sup>1</sup>, Saman Fathi Kocheh Tala<sup>2</sup>, Ali Naseri<sup>3</sup>

---

**ARTICLE INFO****Article history**

Received 8 March, 2018

Accepted 13 April, 2018

---

**Key words:**

Irregularities

Progressive failures

Dual steel structures

Seismic behavior

---

**ABSTRACT**

In a general category, it is possible to divide the various irregular types of structures in height into two irregular geographic and nonlinear groups. In a geometric disorientation at elevation, the dimensions of the structure plan are significant at significant altitudes. In non-horizontal non-uniformity in height, sudden changes occur in the dynamic properties of the structure, including mass, stiffness and lateral resistance of the structure at height. Progressive breakdowns usually lead to a partial collapse of the entire structure, extending a primary damage within the structure, which is like a chain reaction. Studies on structural system failures In recent years, the importance of the phenomenon-failure phenomenon due to abnormal loading due to sudden damage, earthquake, explosion, earthquake, and so on. In this study, four steel structures with a dual-side duct frame, a special bending frame and specially designed 5, 10, 15, and 20 Story collimator brackets were designed in Etabs 2016 software. Then, using the US Department of Comprehensive Maintenance Manual and the method selection The alternative load transfer route, the well-known structures in OpenSEES software is modeled 3D and uses neonotope dynamic analysis to investigate the irregularities of the damping of the perpendicular system on the structural behavior of the seismic behavior in the progressive failure. After analyzing the results of the analysis, it was observed that the irregularity of the cutoff of the lateral load system reduced the structure and stability of the structure and reduced the structural strength against progressive failure.

---

Corresponding author: Sina Rezaei

E-mail addresses: Sina1987\_7@yahoo.com

