



بررسی تاثیر میزان خروج از مرکزیت سازه بر روی خرابی پیش رونده در سازه های فلزی

نادر فنائی^۱، رضا جهاندار^۲

چکیده

خرابی پیش رونده یک سازه به صورت یک واکنش زنجیره ای یا انتشار خرابی ناشی از صدمه موضعی به ناحیه نسبتاً کوچکی از سازه تعریف می شود. در این تحقیق برای یک ساختمان ۴ طبقه فلزی که یک بار در منطقه با خطر زلزله زیاد و بار دیگر در منطقه با خطر زلزله کم قرار گرفته است، پدیده خرابی پیش رونده مطالعه شده و اثر میزان خروج از مرکزیت (فاصله مرکز جرم و مرکز سختی سازه در پلان آن) بر روی این پدیده بررسی شده است. به منظور تأمین خروج از مرکزیت کوچک از سازه با پلان مربعی و برای تأمین خروج از مرکزیت بزرگ از سازه با پلان L شکل استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که حذف ستون های گوشه که دور از مرکز جرم قرار دارند و به مرکز سختی نزدیک ترند بحرانی تر بوده و احتمال تخریب کلی سازه بیشتر است. همچنین به دلیل نوع طراحی سازه های واقع در مناطق با لرزه خیزی پائین، میزان ماکزیمم جابجائی گره بالای ستون محذوف بطور میانگین $2/4$ برابر میزان ماکزیمم جابجائی این گره در سازه های واقع در مناطق لرزه خیزی بالا می باشد که این امر نشان دهنده ایمن بودن سازه های در مناطق با لرزه خیزی بالا نسبت به سازه های دیگر در برابر پدیده خرابی پیشرونده می شود.

واژگان کلیدی:

خرابی پیش رونده، قاب فلزی مهاربندی شده، قاب فلزی خمشی، پلان منظم، پلان نامنظم، خروج از مرکزیت

۱. عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، rezajj67@gmail.com



خرابی پیش رونده ی یک ساختمان پدیده ای است که در آن شکست یک عضو سازه ای منجر به فرو ریختن قسمتی از سازه یا کل سازه می شود. با توجه به ماهیت بارهای ضربه ای، بارهای ناشی از انفجار و یا حوادث لرزه ای، احتمال زیادی وجود دارد که پس از اعمال چنین بارهایی به سازه، برخی از المان های سازه به ویژه ستون ها، بصورت ناگهانی حذف شده و توان باربری شان را از دست بدهند و در نتیجه مکانیسم خرابی پیش رونده در سازه آغاز شود. حذف ناگهانی یک یا چند المان از سازه معمولاً همراه با اعمال ضربه به عضو های اطراف آن و تحمیل تغییر شکل های بزرگ در کسری از ثانیه به سازه می باشد. روش های متنوعی برای کاهش احتمال خطر خرابی پیش رونده، در سازه ها پیشنهاد شده است که مهمترین و عمده ترین این روش ها عبارتند از:

- روش کنترل حادثه (Event Control Method)

- روش طراحی غیر مستقیم (Indirect Design Method)

- روش طراحی مستقیم (Direct Design Method)

در دستور العمل های GSA [۱] و DOD [۲] که به منظور بررسی رفتار سازه تحت مکانیسم خرابی پیش رونده تالیف شده اند سه روش آنالیز استاتیکی خطی، استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی آمده است.

۲. مدل سازی و تحلیل دینامیکی

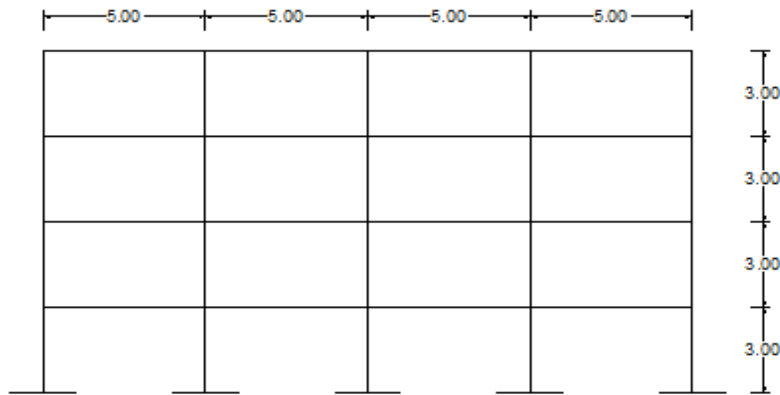
به منظور بررسی و مقایسه رفتار ساختمان های با قاب های مهاربندی شده و خمشی در برابر خرابی پیش رونده، چند ساختمان چهار طبقه مطابق ASCE [۳] بارگذاری و مطابق AISC ۲۰۱۰ [۴] و بوسیله نرم افزار ETABS ۲۰۱۳ [۵] طراحی گردیده اند. به منظور مدل سازی بارهای موجود در ساختمان از بار مرده $4 \frac{KN}{m^2}$ و بار زنده $2.64 \frac{KN}{m^2}$ برای طبقات و بار زنده $0.96 \frac{KN}{m^2}$ برای بام استفاده شده است. سپس ساختمان های مورد نظر با توجه به مقاطع فولادی بدست آمده برای تیرها، ستون ها و مهاربندها برای بررسی خرابی پیش رونده در نرم افزار OpenSees [۶] مدل شده و با استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیر خطی، تغییر مکان قائم گره بالای ستون محذوف محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است.



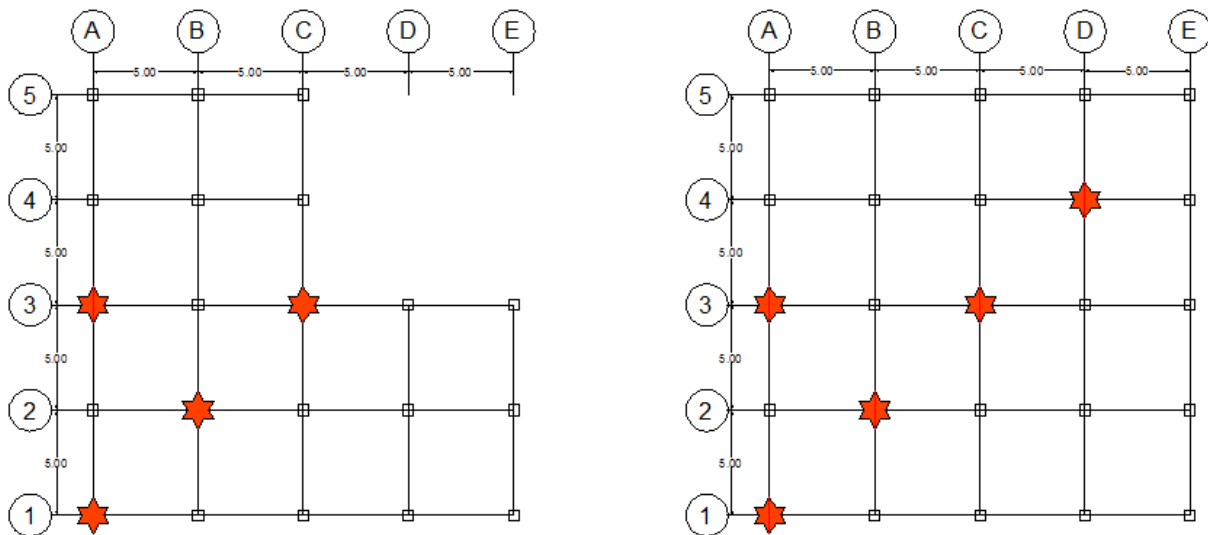
پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



در شکل (۱) نمای کلی سازه ارائه شده است که یک قاب چهار دهانه چهار طبقه می باشد. در این تحقیق از پلان مربعی و پلان L شکل به ترتیب برای تأمین خروج از مرکزیت های کم (کمتر از ۲۰ درصد) و زیاد (بیشتر از ۲۰ درصد) استفاده شده که به همراه موقعیت ستون های محذوف برای بررسی خرابی پیش رونده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمای سازه



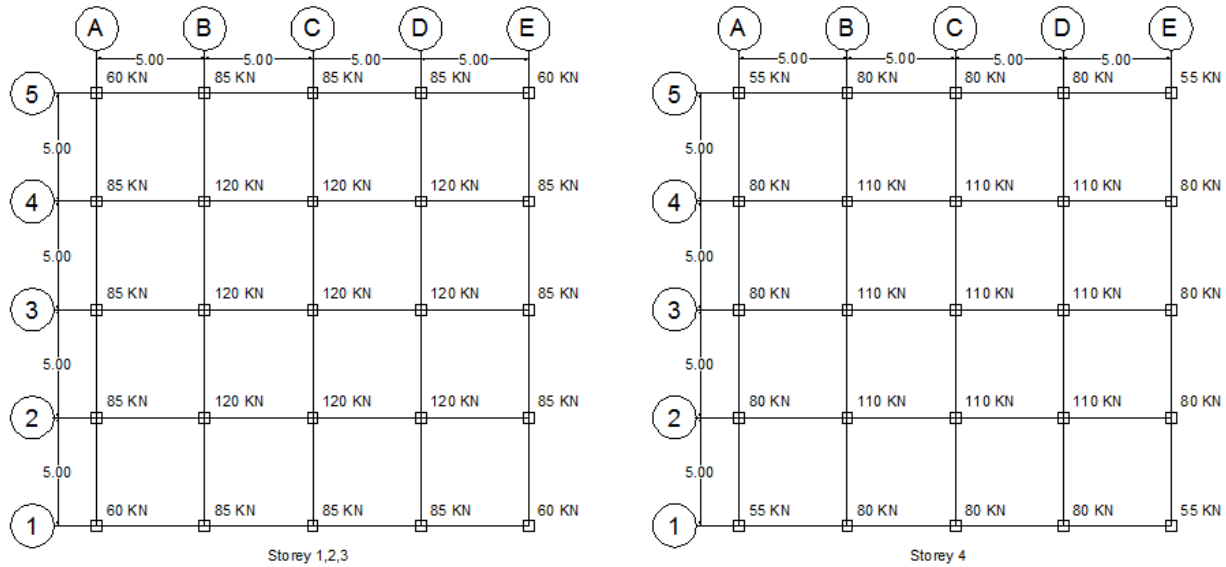
شکل (۲): موقعیت ستون های محذوف در پلان های منظم و نامنظم



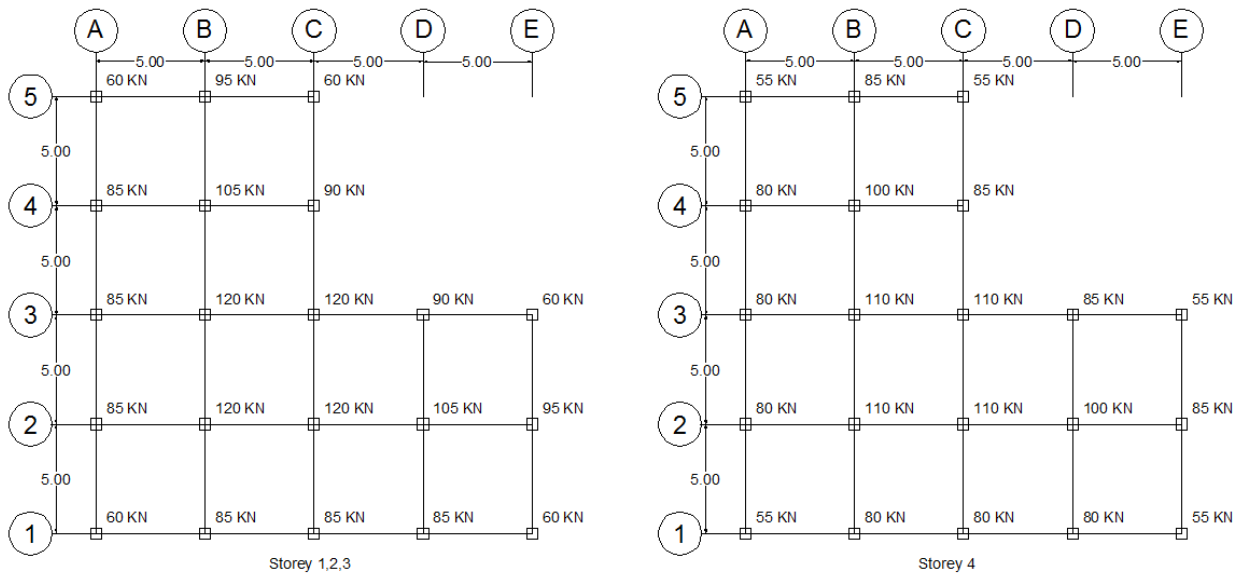
پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



در این تحلیل بارهای اختصاص داده شده به هر گره بر اساس ترکیب بار $DL+0.2LL$ که در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شده است به مدت زمان ۵ ثانیه به صورت خطی افزایش یافته تا به مقدار نهایی خود برسند. بعد از آن به مدت ۲ ثانیه ثابت نگه داشته می شوند تا سیستم به یک شرایط پایدار برسد سپس ستون مورد نظر به صورت ناگهانی در ثانیه هفتم حذف شده و به مدت ۱۰ ثانیه یعنی تا ثانیه هفدهم بارگذاری را ادامه داده و رفتار سازه را مورد بررسی و نتایج را ثبت می کنیم.



شکل (۳): بارهای اختصاص داده شده به هر گره در مدل های اول تا چهارم



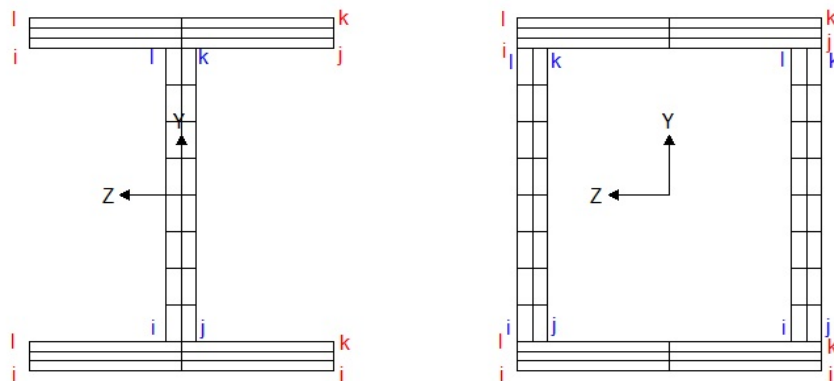
شکل (۴): بارهای اختصاص داده شده به هر گره در مدل های پنجم تا هشتم



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



در نرم افزار OpenSees تیرها، ستون ها و مهاربندها با المان Nonlinear Beam Column مدل شده اند و از مصالح غیرخطی Steel02 برای ساخت مصالح فولادی، تبدیل هندسی خطی Linear Transformation برای انتقال سختی و نیروی مقاوم اعضا از سیستم پایه به سیستم مختصات کلی و از میرایی ریلی 5 درصد استفاده شده است. مقطع المان ها مطابق شکل (5) از نوع فایبر که یک شکل هندسی عمومی دارد و از نواحی با اشکال مستطیلی تشکیل شده است می باشد. [7].



شکل (5): مقاطع فایبر و مش بندی (پیچ) آنها

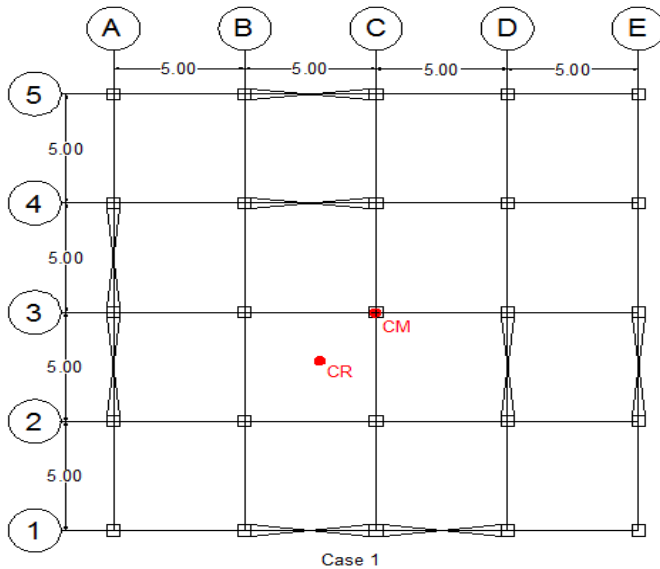
با توجه به اینکه در مسائل سه بعدی المان های سازه ای تحت پیچش قرار می گیرند و در هنگام تحلیل برنامه پیغام اختطار مبنی بر اینکه سختی پیچشی المان ها صفر می باشد را خواهد داد برای در نظر گیری سختی پیچشی در المان ها با استفاده از Section Aggregator سختی پیچشی هر مقطع را به مقاطع اضافه می کنیم. همچنین از rigid Diaphragm برای تعریف دیافراگم صلب طبقات استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر میزان خروج از مرکزیت روی پدیده خرابی پیش رونده از 8 مدل پلان مختلف استفاده شده که در ادامه به همراه پروفیل های مورد استفاده، ارائه گردیده است:



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



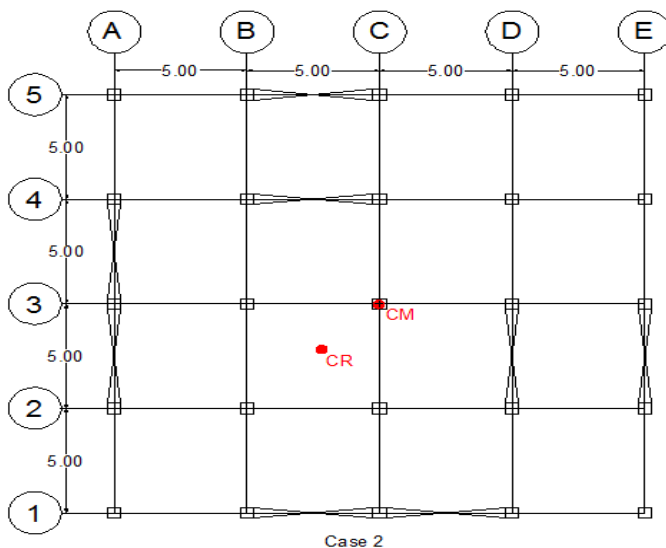
پلان اول: ساختمان با پلان مربعی (خروج از مرکزیت کمتر از ۲۰ درصد)، با قاب های مهاربندی شده و در منطقه با لرزه خیزی پایین



مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۳	تیرها
HSS ۹x۹x۱/۲	ستون ها
HSS ۵x۵x۱/۲	مهاربندها

شکل (۶): پلان مدل اول

پلان دوم: ساختمان با پلان مربعی (خروج از مرکزیت کمتر از ۲۰ درصد)، با قاب های مهاربندی شده و در منطقه با لرزه خیزی بالا



مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۹	تیرها
HSS ۱۰x۱۰x۵/۸	ستون ها
HSS ۶x۶x۵/۸	مهاربندها

شکل (۷): پلان مدل دوم

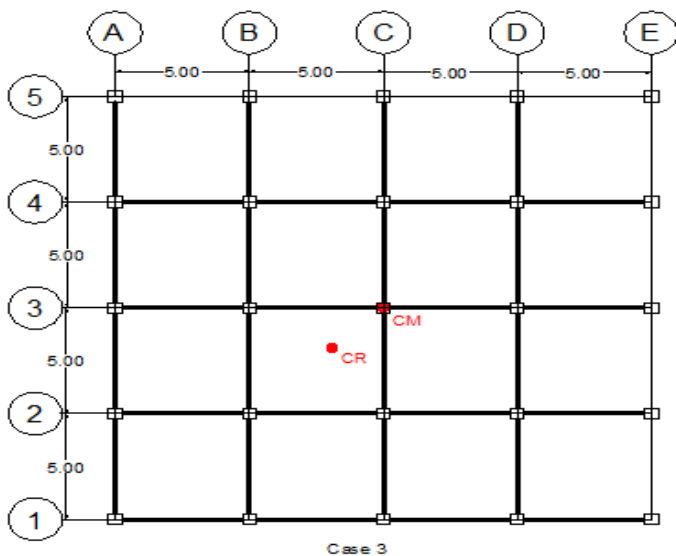


پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



پلان سوم: ساختمان با پلان مربعی (خروج از مرکزیت کمتر از ۲۰ درصد)، با قاب های خمشی و در منطقه با

لرزه خیزی پایین (به منظور تامین خروج از مرکزیت قاب ۵ و قاب E ثقلی می باشند)

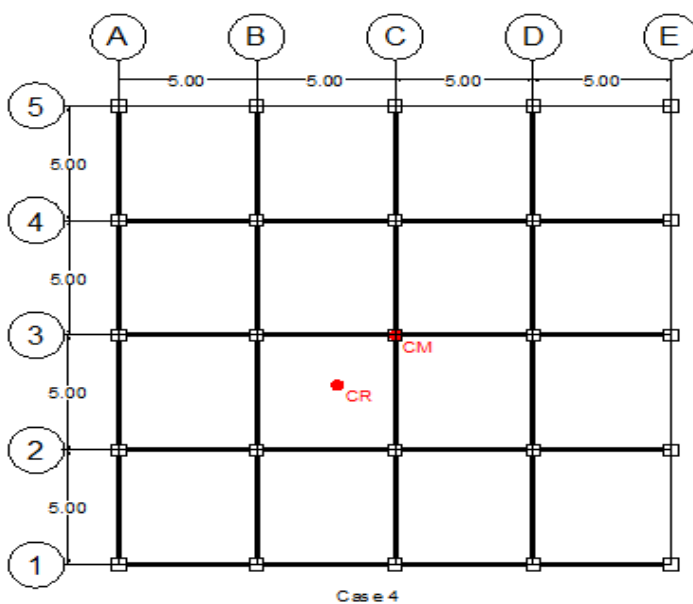


مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۳	تیرها
HSS ۹x۹x۱/۲	ستون ها
-	مهاربندها

شکل (۸): پلان مدل سوم

پلان چهارم: ساختمان با پلان مربعی (خروج از مرکزیت کمتر از ۲۰ درصد)، با قاب های خمشی و در منطقه

با لرزه خیزی بالا (به منظور تامین خروج از مرکزیت قاب ۵ و قاب E ثقلی می باشند)



مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۹	تیرها
HSS ۱۰x۱۰x۵/۸	ستون ها
-	مهاربندها

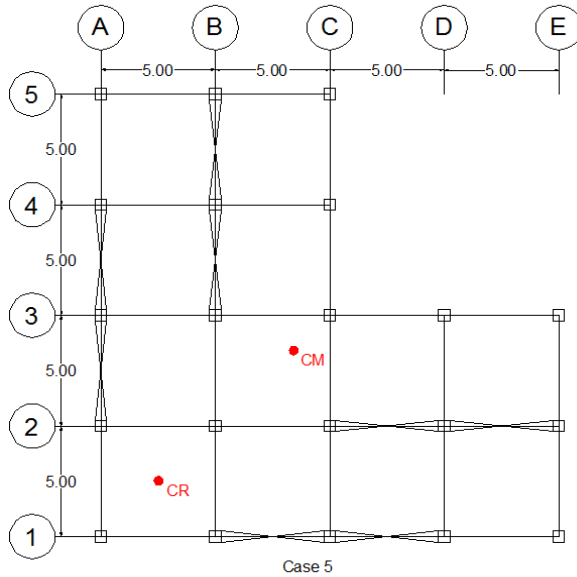
شکل (۹): پلان مدل چهارم



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



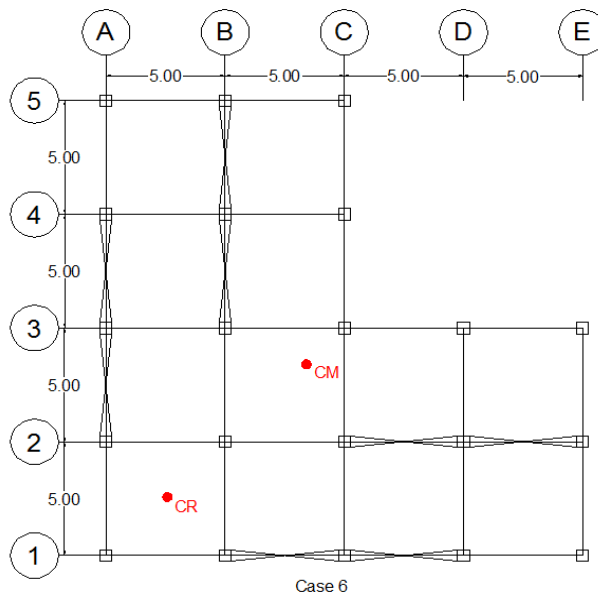
پلان پنجم: ساختمان با پلان L شکل (خروج از مرکزیت بیشتر از ۲۰ درصد)، با قاب های مهاربندی شده و در منطقه بالرزه خیزی پایین



مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۳	تیرها
HSS ۹x۹x۱/۲	ستون ها
HSS ۵x۵x۱/۲	مهاربندها

شکل (۱۰): پلان مدل پنجم

پلان ششم: ساختمان با پلان L شکل (خروج از مرکزیت بیشتر از ۲۰ درصد)، با قاب های مهاربندی شده و در منطقه بالرزه خیزی بالا



مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۹	تیرها
HSS ۱۶x۱۶x۵/۸	ستون ها
HSS ۶x۶x۵/۸	مهاربندها

شکل (۱۱): پلان مدل ششم

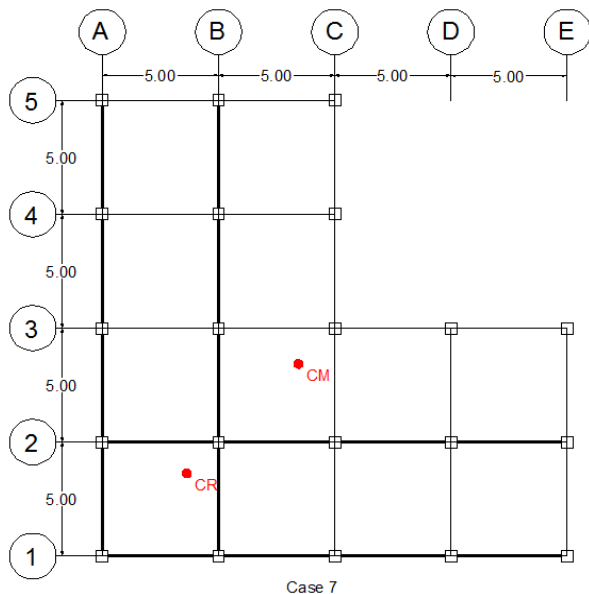


پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



پلان هفتم: ساختمان با پلان L شکل (خروج از مرکزیت بیشتر از ۲۰ درصد)، با قاب های خمشی و در منطقه

با لرزه خیزی پایین (به منظور تامین خروج از مرکزیت قاب های ۳، ۴، ۵ و قاب های C, D, E ثقیلی می باشند)

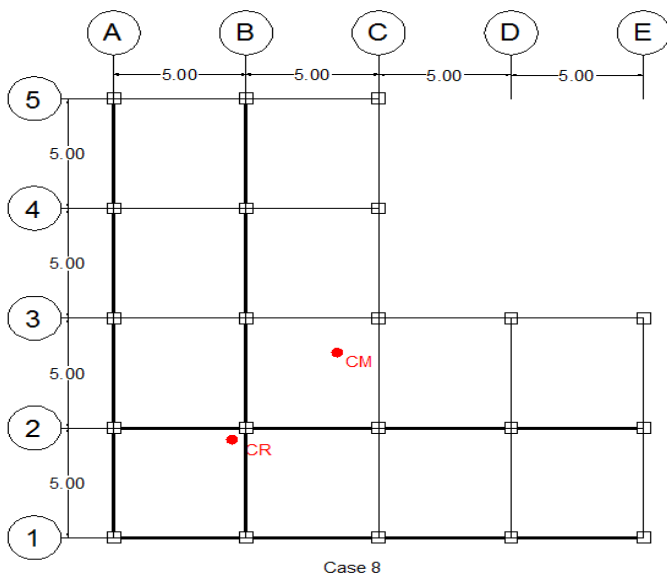


مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۳	تیر ها
HSS ۹x۹x۱/۲	ستون ها
-	مهاربندها

شکل (۱۲): پلان مدل هفتم

پلان هشتم: ساختمان با پلان L شکل (خروج از مرکزیت بیشتر از ۲۰ درصد)، با قاب های خمشی و در

منطقه با لرزه خیزی بالا (به منظور تامین خروج از مرکزیت قاب های ۳، ۴، ۵ و قاب های C, D, E ثقیلی می باشند)



مقاطع طراحی	
W ۱۰x۳۹	تیر ها
HSS ۱۲x۱۲x۵/۸	ستون ها
-	مهاربندها

شکل (۱۳): پلان مدل هشتم



۳. تحلیل دینامیکی غیرخطی و نتایج حذف ستون

۳.۱. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل اول

در جدول (۱) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان داده شده است:

جدول (۱): نتایج مدل اول

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-1.60944	-0.00692	-1.42131	-1.42467	-1.44619
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-1.67684	-0.01067	-1.33741	-1.33245	-۱,۳۸۹۴۶

گره های A^۱ و D^۴ که در گوشه های پلان قرار دارند از بیشترین پتانسیل خرابی پیشرونده برخوردارند. ستون A^۳ بدلیل وجود مهاربند در اتصال گره بالای این ستون از کمترین پتانسیل خرابی پیشرونده برخوردار است.

۳.۲. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل دوم

در جدول (۲) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان داده شده است:

جدول (۲): نتایج مدل دوم

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-0.65587	-0.00483	-0.61673	-0.62073	-0.62760
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-0.61044	-0.00774	-0.55128	-0.55737	-0.57492

در این مدل بدلیل استفاده از مقاطع قوی تر نسبت به مدل اول میزان جابجایی گره بالای ستون محذوف به شدت کاهش پیدا کرده است. در این مدل نیز گره های A^۱ و D^۴ که در گوشه های پلان قرار دارند از بیشترین



پنجمین کنفرانس ملی
و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



پتانسیل و ستون A^۳ بدلیل وجود مهاربند در گره بالای این ستون از کمترین پتانسیل خرابی پیشرونده برخوردارند.

۳.۳. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل سوم

در جدول (۳) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان داده شده است:

جدول (۳): نتایج مدل سوم

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-1.64606	-1.24945	-1.43426	-1.42117	-1.44977
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-۱,۶۹۷۲۷	-۱,۱۸۸۱۲	-۱,۳۴۹۲۳	-1.32876	-1.37656

در این مدل ماکزیمم جابجایی گره A^۳ به دلیل عدم اتصال به مهاربند بیشتر از مدل های اول و دوم شده است. با این حال جابجایی این گره از گره های دیگر کمتر می باشد.

۳.۴. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل چهارم

در جدول (۴) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان داده شده است:

جدول (۴): نتایج مدل چهارم

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-0.68086	-0.49741	-0.61864	-0.61802	-0.62747
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳	D ^۴
ماکزیمم جابجایی قائم	-۰,۶۲۵۹۹	-۰,۴۵۹۱۷	-۰,۵۵۳۳۲	-۰,۵۵۴۸۹	-۰,۵۷۰۰۵



۳.۵. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل پنجم

در جدول (۵) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان

داده شده است:

جدول (۵): نتایج مدل پنجم

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-1.60746	-0.00691	-1.41121	-1.41222
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-1.67586	-0.01055	-1.32749	-1.32561

در این مدل نیز کمترین پتانسیل خرابی پیشرونده مربوط به گره A^۳ و بیشترین پتانسیل خرابی پیشرونده مربوط به گره A^۱ که در گوشه بیرونی پلان قرار دارد می باشد.

۳.۶. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل ششم

در جدول (۶) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان

داده شده است:

جدول (۶): نتایج مدل ششم

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-0.60529	-0.00378	-0.60194	-0.60969
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-۰,۵۳۸۱۴	-۰,۰۰۵۸۱	-۰,۵۳۳۸۴	-۰,۵۴۳۸۹



۳.۷. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل هفتم

در جدول (۷) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان داده شده است:

جدول (۷): نتایج مدل هفتم

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-1.64388	-1.25374	-1.43261	-1.41648
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-1.69701	-1.18835	-1.34729	-1.32658

۳.۸. بررسی انواع حالات حذف ستون از مدل هشتم

در جدول (۸) موقعیت ستون حذف شده و ماکزیمم جابجایی قائم گره بالای ستون محذوف این مدل نشان داده شده است:

جدول (۸): نتایج مدل هشتم

موقعیت ستون حذف شده در طبقه اول	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-0.63527	-0.49307	-0.61109	-0.61288
موقعیت ستون حذف شده در طبقه سوم	A ^۱	A ^۳	B ^۲	C ^۳
ماکزیمم جابجایی قائم	-0.56259	-0.45072	-0.54460	-0.54850



- (۱) در تمامی حالات بررسی شده، حذف ستون گوشه و بیرونی (A۱) واقع در طبقه اول وضعیت بحرانی تری را در سازه ایجاد کرده و بیشترین پتانسیل خرابی پیشرونده را دارا می باشد که این امر به دلیل کمتر بودن تیرهای متصل به این ستون به منظور بازپخش بارهای تحمل شده توسط این ستون به قسمت های دیگر سازه می باشد. در سازه های مهاربندی حذف ستون متصل به مهاربند، کمترین میزان جابجایی قائم‌گرمه بالای ستون محذوف را در پی دارد که در نتیجه این حالت کمترین پتانسیل خرابی پیشرونده را دارا می باشد.
- (۲) با مقایسه نتایج حذف ستون های نزدیک به مرکز جرم و نزدیک به مرکز سختی می توان نتیجه گرفت که ستون های میانی نزدیک به مرکز جرم، پتانسیل ایجاد خرابی پیشرونده کمتری را نسبت به ستون های کناری نزدیک به مرکز سختی در سازه های مورد تحقیق دارا می باشند. بنابراین هرچقدر از مرکز پلان به سمت گوشه ها حرکت کنیم، حذف ستون، پتانسیل خرابی پیشرونده بیشتری را ایجاد می کند.
- (۳) با بررسی نتایج کلیه مدل ها می توان دریافت که میزان ماکزیمم جابجایی قائم‌گرمه بالای ستون محذوف برای مناطق با خطر لرزه خیزی پایین به طور میانگین، $2/4$ برابر مناطق با خطر لرزه خیزی بالا می باشد که این امر به دلیل نوع طراحی و مقاطع ضعیف تر سازه های واقع در مناطق باخطر لرزه خیزی پائین می باشد.
- (۴) ماکزیمم جابجایی قائم‌گرمه بالای ستون محذوف طبقه اول برای سازه هایی که برای مناطق با خطر لرزه خیزی بالا طراحی شده اند، به طور میانگین ۱۰ درصد و برای سازه هایی که برای مناطق با خطر لرزه خیزی پائین طراحی شده اند، به طور میانگین ۵ درصد بیشتر از ماکزیمم جابجایی قائم‌گرمه بالای ستون محذوف طبقه سوم واقع در همان راستا می باشد. بنابراین حذف ستون طبقات پایتتر وضعیت بحرانی تری نسبت به حذف ستون طبقات بالاتر را ایجاد می کند.



- [۱] Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, General Services Administration, Washington, D.C.GSA ۲۰۰۳.
- [۲] Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Department of Defense, DoD, Unified Facilities Criteria, UFC ۲۰۱۰.
- [۳] Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, ASCE ۷-۲۰۱۰.
- [۴] Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, AISC ۳۶۰-۲۰۱۰.
- [۵] ETABS ۲۰۱۳ Version ۱۳,۱, Extended Three Dimensional (۳D) Analysis and design of Building System, Computers and Structures, Inc. ۱۹۹۵ University Avenue, Berkeley, California, USA ۹۴۷۰۴.
- [۶] OpenSees versin ۲,۴,۰, Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [۷] OpenSees Command Language Manual, Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael Scott, Gregory L. Fenves, et al.