

ارزیابی روند تخریب پیش‌رونده در سازه بتنی

رضا اسماعیل آبادی

دکتر، هیات عملی دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران
Esmailabadi@riau.ac.ir

حمیدرضا ظهره‌وند

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران

محمد افزلی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، تهران، ایران
Afzali.m64@gmail.com

کلید واژه‌ها: انهدام پیش‌رونده، حذف ستون، مفصل پلاستیک، روش مسیر جایگزین، DOD

چکیده

یکی از مسائل مهم در سازه‌هایی با اهمیت زیاد پایداری سازه و ایمنی جانی ساکنین بعد از حذف یکی از ستون‌های سازه به هر علتی از جمله حملات تروریستی، انفجار در اثر وسایل مورد استفاده در سیستم گرمایشی و آشپزخانه، برخورد اجسام با سازه و دلایل دیگر که باعث از بین رفتن ستون در سازه می‌شود، می‌باشد. در این مقاله، عملکرد سیستم قاب خمشی بتنی با دو شکل پذیری متوسط و زیاد در مقابل انهدام پیش‌رونده مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نمونه‌ها به صورت سه بعدی در سازه‌های ۱۰ طبقه مدل‌سازی شده‌اند. روش مورد استفاده، روش مسیر جایگزین است که در استاندارد DOD2013 معرفی شده است. در این تحقیق، تحلیل دینامیکی غیرخطی، طی سناریوی حذف ستون در طبقه اول انجام شده است. در این تحقیق سعی شده است، که ستون بحرانی ساختمان که شامل ستون گوشه ساختمان می‌باشد، برای بررسی رفتار و عملکرد دو قاب خمشی متوسط و ویژه از سازه حذف شود.

نتایج حاصل نشان داد که قاب خمشی متوسط از قاب خمشی ویژه در سناریوهای فوق ضعیف‌تر عمل کرده و نیاز به مقاوم‌سازی بیشتری دارد و با ایجاد مفاصل پلاستیک بیشتر در قاب خمشی متوسط نسبت به قاب ویژه عملکرد ضعیف قاب متوسط نسبت به قاب ویژه دیده می‌شود.

مقدمه

تهدیدها به دو دسته تهدیدهای طبیعی و انسان ساز تقسیم می‌گردند. تهدیدهای طبیعی مانند سیل، زلزله و توفان می‌باشند. تهدیدهای انسان ساز نیز به سه دسته تقسیم می‌گردد؛ تهدیدهای نظامی، تهدیدهای امنیتی، تهدیدهای اتفاقی. تهدیدهای نظامی شامل تهاجم هوایی، زمینی و دریایی می‌باشد. تهدیدهای امنیتی نیز شامل خرابکاری، بمب گذاری و ... می‌گردند. تهدیدهای اتفاقی شامل آتش سوزی، انفجار مخازن سوخت و یا نشت مواد خطرناک می‌باشد (پیش‌نویس مبحث ۲۱، ۱۳۸۸).

تردید نیست که ایران کشوری لرزه خیز است و وقوع زلزله در کشور ما نه احتمال که امری قطعی است و پیوسته باید منتظر وقوع زلزله‌ای با شدتی کم یا زیاد در پهنه سرزمین خود باشیم. آنچه در این میان حایز اهمیت می‌باشد این است که زلزله رویداد طبیعی همانند رویدادهای دیگر چون برف و باران است. با توجه به انواع مخاطرات یاد شده طراحی سازه‌هایی با اهمیت متوسط و زیاد از جمله وظایف مهندسین می‌باشد. هنوز بیش از ۵۰ سال، از زمانی که برای اولین بار عبارت "انهدام پیش‌رونده" وارد ادبیات طراحی سازه‌های شده، نمی‌گذرد. در این نیم قرن، سه اتفاق بزرگ سبب توجه مهندسین، به این نوع از خرابی شده است. در سال ۱۹۶۸ اولین حادثه‌ای که اتفاق افتاده است، باعث انهدام یک دهانه کامل از ساختمان آپارتمان رونان شده است (شکل ۱). در اتفاق دوم، ساختمان فدرال پی، موررا در سال ۱۹۹۵، در اثر انفجار بمب دچار تخریب عظیمی شد و آخرین اتفاق در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ اتفاق افتاد و طی آن دو برج شمالی و جنوبی مرکزی تجارت جهانی در نیویورک، در اثر برخورد دو هواپیما، به طور کامل تخریب شدند. این سه اتفاق شاید در نگاه اول متفاوت به نظر برسند، اما در واقع هر سه یک وجه تشابه دارند و آن این که در حالت کلی، حذف یک یا چند عضو اولیه منجر به تخریب همه یا بخش عظیمی از سازه شده است (R.Shankar Nair, 2005).



شکل ۱: ساختمان اصلی رونان بعد از انهدام

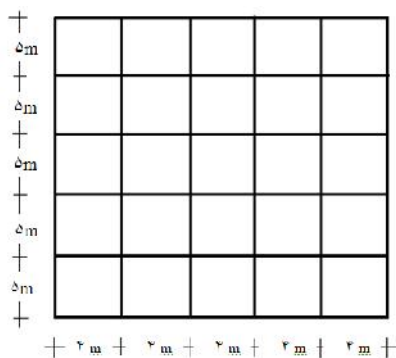
در طی این ۵۰ سال تحقیقات گسترده‌ای بر روی این موضوع صورت گرفته است. در سال‌های اخیر، موسسه خدمات عمومی General Services Administration و وزارت دفاع Department of Defense، کشور آمریکا مطالعات زیادی بر روی این موضوع انجام داده‌اند، که مورد توجه مهندسين بسياري قرار گرفته است. در تعریفی استاندارد DOD (2013)، انهدام پیش رونده را به معنی انهدام و تخریب کامل همه یا بخش عظیمی از سازه است که در اثر خرابی یا شکست بخش نسبتاً کوچکی از سازه، به سرعت اتفاق می‌افتد، در نظر گرفته است. در روش مسير بار جایگزین رفتار سازه بعد از حذف یک عضو برابر اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. مزیت این روش مستقل بودن آن از بارگذاری انفجاری می‌باشد. (General Service Administration (GSA), 2005) در این مقاله سعی شده است، که بر روی دو نوع ساختمان متعارف بتنی قاب خمشی متوسط و ویژه، بعد از حذف ستون گوشه در دهانه بزرگتر، در دو طبقه همکف این نوع قاب‌ها مورد مطالعه قرار بگیرد. برای رسیدن به این هدف از نرم‌افزار Sap2000v 14.2.2 برای مدل‌سازی و انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل سازی ، بارگذاری و تحلیل

در این مقاله، مسئله انهدام پیش رونده در قاب های خمشی بتنی، با شکل‌پذیری متوسط و زیاد در نرم افزار Sap2000 مدل سازی شده است که در ادامه به روش انجام کار می پردازیم.

مدل سازی و بارگذاری

این قاب‌ها ۱۰ طبقه و در ۵ دهانه (راستای X، ۴ متری و در راستای Y، ۵ متری) و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر به صورت سه بعدی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ پلان سازه بتنی مورد مطالعه نمایش داده شده است.



شکل ۲: پلان سازه مورد مطالعه

برای بارگذاری، از ترکیب بار ثقلی معرفی شده در DOD استفاده شده که به این صورت تعریف می‌شود:

$$G_{ND} = 1.2D + (0.5L \text{ OR } 0.2S)$$

در این ترکیب بار، D معرف بارهای مرده، L معرف بارهای زنده و S معرف بار برف می‌باشد. مقدار بار مرده و زنده اعمال شده به سازه در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱: بارهای وارد شده به سازه‌ی بتنی

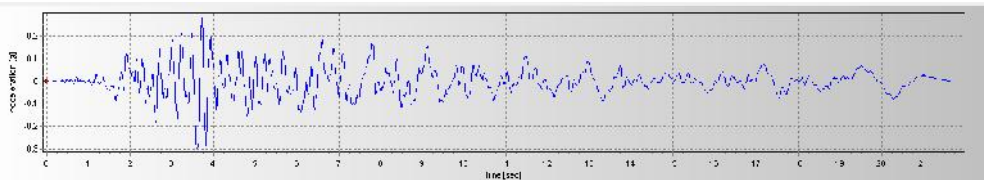
مقدار بار	نوع بار وارده
۶۰۰ kg/m ²	بار مرده سقف طبقات
۵۵۰ kg/m ²	بار مرده سقف بام
۶۵۰ kg/m ²	بار مرده اتاق پله
۲۰۰ kg/m ²	بار زنده سقف طبقات
۱۵۰ kg/m ²	بار زنده سقف بام
۲۵۰ kg/m ²	بار دیوارهای جانبی

هر یک از قاب‌ها خمشی بتن مسلح بر اساس آیین نامه ACI318 و با نرم افزار SAP2000 به صورت استاتیکی خطی طراحی و مقاطع بدست آورده شده است.

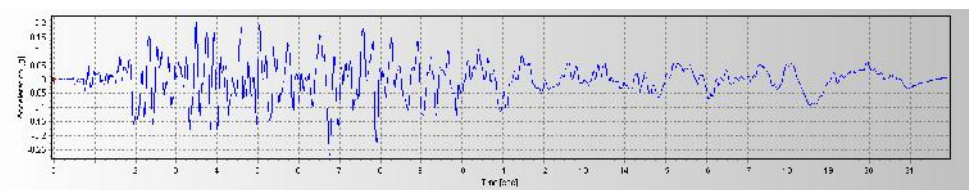
برای قاب خمشی متوسط در سه طبقه اول از ستون‌های ۷۰×۷۰ سانتیمتری، برای طبقه چهارم تا هفتم از ستون ۶۰×۶۰ سانتیمتر و برای بقیه ستون‌ها ۵۰×۵۰ سانتیمتر می‌باشد. تیرهای چهار طبقه اول ۵۰×۵۰ سانتیمتر، چهار طبقه دوم نیز ۴۵×۴۵ سانتیمتر و ۲ طبقه آخر ۴۰×۴۰ سانتیمتر می‌باشد.

برای قاب خمشی ویژه در سه طبقه اول از ستون‌های ۶۰×۶۰ سانتیمتری، برای طبقه چهارم تا هفتم از ستون ۵۰×۵۰ سانتیمتر و برای بقیه ستون‌ها ۴۰×۴۰ سانتیمتر می‌باشد. تیرهای چهار طبقه اول ۴۰×۴۰ سانتیمتر، چهار طبقه دوم نیز ۳۵×۳۵ سانتیمتر و ۲ طبقه آخر ۳۰×۳۰ سانتیمتر می‌باشد.

ستون که قرار است حذف آنها مورد بررسی قرار گیرد، ستون گوشه در تراز طبقه همکف می‌باشد. دلیل انتخاب این سناریو توصیه‌ی استاندارد DOD برای انتخاب سناریوهای بحرانی برای بررسی انهدام پیشرونده می‌باشد و علاوه بر این توصیه‌ها ستون‌های واقع شده در طبقه همکف نسبت به بقیه ستون‌های سازه در معرض خطر بیشتری از جمله برخورد می‌باشند. دال سازه به صورت یکطرفه در نظر گرفته شده است. بار گذاری جانبی وارد بر سازه از نوع بار زلزله می‌باشد. در این تحقیق سه رکورد بارگذاری که به صورت زوج رکورد افقی می‌باشند، انتخاب شده است. برای اعمال بار جانبی از رکوردهای زلزله نورتریج (Northridge)، سانفرناندو (San Fernando) و مورگان هیل (Morgan Hill) به صورت زوج شتاب نگاشت می‌باشند، بر روی سازه اعمال شده‌اند. برای هم‌پایه کردن رکوردها از استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است و بر طبق موارد اشاره شده در این استاندارد رکوردها هم‌پایه شده و ضریب اعمال نیروی زلزله حساب شده است. در اشکال ۳ تا ۸ رکوردهای زلزله‌های نورتریج، سانفرناندو و مورگان هیل در دو جهت انتخاب شده نمایش داده شده است. در این مطالعه، نسبت میرایی برابر با ۵٪ در نظر گرفته شده است.

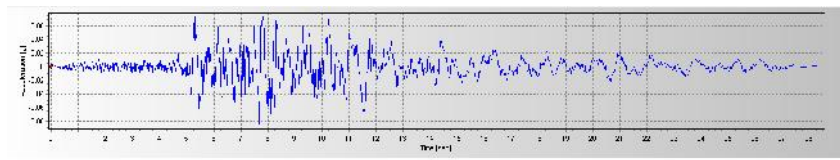


شکل ۳: شتاب زلزله نورتریج در راستای افقی ۱

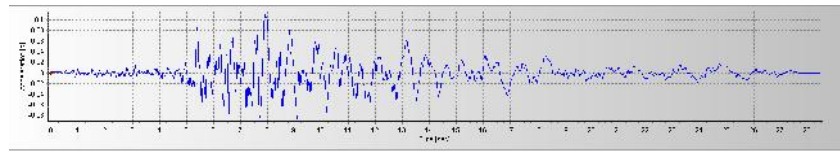


شکل ۴: شتاب زلزله نورتریج در راستای افقی ۲

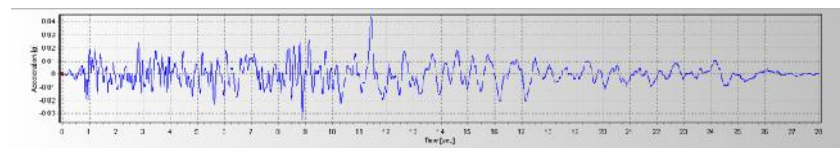




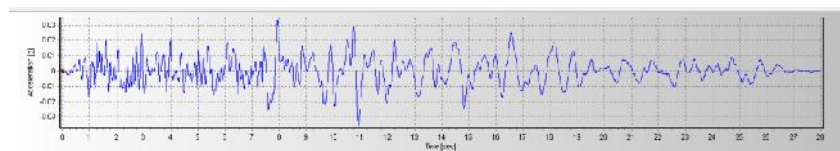
شکل ۵: شتاب زلزله سانفرناندو در راستای افقی ۱



شکل ۶: شتاب زلزله سانفرناندو در راستای افقی ۲



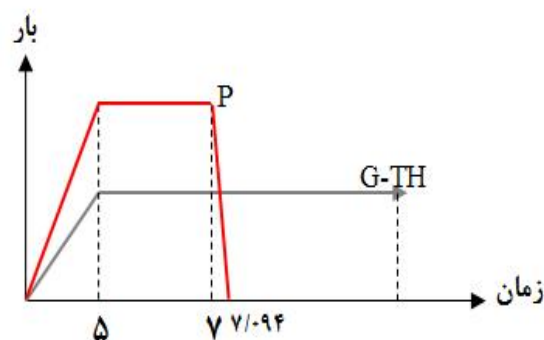
شکل ۷: شتاب زلزله مورگان هیل در راستای افقی ۱



شکل ۸: شتاب زلزله مورگان هیل در راستای افقی ۲

تحلیل

روش تحلیل مورد استفاده در این مطالعه، تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌باشد. با توجه به این که حذف یک عضو، یک اتفاق دینامیکی و رفتار واقعی مصالح، غیرخطی است، واضح است که تحلیل دینامیکی غیرخطی نسبت به سایر روش‌های تحلیل، پاسخ‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهد. البته قبل از این تحلیل برای به دست آوردن نیروهای داخلی ستونی که قرار است حذف شود، تحلیل استاتیکی خطی انجام شده است. بعد از محاسبه این نیروهای داخلی آن‌ها را به صورت بارهای متمرکز بر گره بالای ستون حذف شده اعمال می‌کنیم و یک تابع تاریخچه زمانی برای آن‌ها تعریف می‌کنیم. در این تابع بایستی دقت شود که نیروهای داخلی در زمانی کمتر از یک دهم پریود سازه، حذف شوند تا ضربه ناشی از حذف ستون در حالت واقعی، مدل شود (D. G Lu and et al. 2010). تابع تعریف شده در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹: تابع تاریخچه زمانی بارهای مرده و زنده و نیروی ستون حذف شده

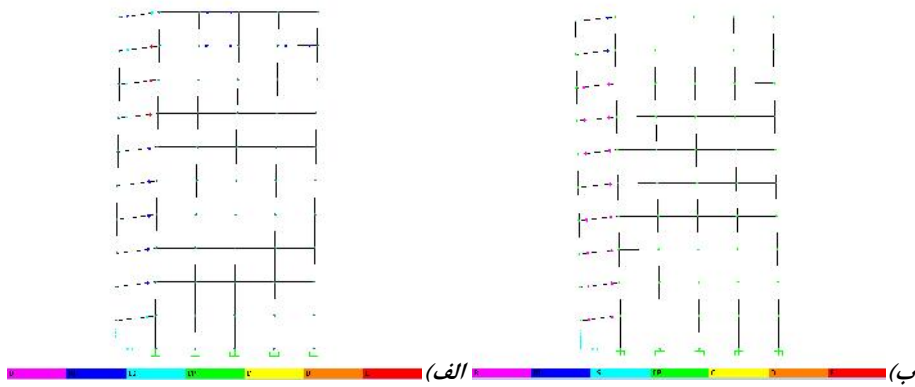
در روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، بارها به صورت تابعی از زمان بر سازه اعمال می‌شوند. همچنین به سازه اجازه داده می‌شود که وارد محدوده غیرخطی شود. در نتیجه انتظار می‌رود که در نقاط ورود المان به محدوده غیرالاستیک مفاصل پلاستیکی تشکیل شوند که با چرخش خود، تا حدودی انرژی را جذب کنند. به طور تئوری، مفصل‌ها می‌توانند در هر نقطه‌ای از طول یک عضو تشکیل شوند، اما در تحلیل‌ها معمولاً اجازه شکل‌گیری مفاصل تنها در دو انتهای اعضا و نیز وسط آن‌ها داده می‌شود. مفاصل تشکیل شده در تیرها، معمولاً ناشی از لنگر خمشی است، حال آن که عمدتاً در یک ستون، اندرکنش بین نیروی محوری و لنگر خمشی سبب ایجاد مفصل می‌شود.

بررسی نتایج

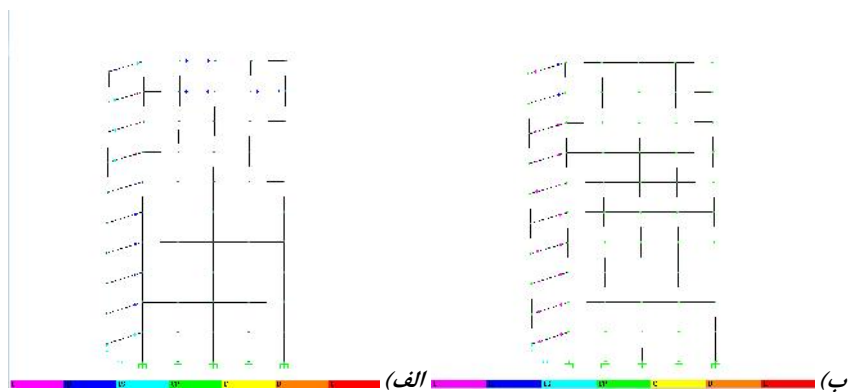
حذف ستون گوشه در طبقه همکف قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری متوسط و ویژه در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در هر شش حالت مورد بررسی برای اعمال بار زلزله‌ها، تغییر شکل نمونه‌ها آورده شده است. برای هر کدام از نمونه‌ها نام‌گذاری به این صورت انجام شده است که زلزله نورتریج با N، زلزله سانفرناندو با S، زلزله مورگان‌هیل با M نمایش داده شده است. X نشان دهنده گرفتن این زلزله در راستای X و Y نشان دهنده جهت Y از سازه می‌باشد. در قاب‌های مورد مطالعه جهت بحرانی از سازه که تعداد مفاصل و خرابی بیشتری رخ داده است، نمایش داده شده است. ابتدا نوع زلزله و سپس راستا زلزله برای نام‌گذاری آورده شده است. در اشکال مورد مطالعه شکل الف مربوط به قاب متوسط و شکل ب قاب خمشی ویژه می‌باشد. در بررسی این سناریوها مشاهده شده است که در جهت X از سازه بحرانی‌تر از جهت Y می‌باشد. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که مفاصل ایجاد شده در قاب خمشی ویژه بنفش و آبی پررنگ می‌باشند، که به ترتیب نشان دهنده قابلیت استفاده بی‌وقفه و خرابی محدود می‌باشند. در قاب خمشی متوسط نیز مفاصل به رنگ آبی پررنگ، فیروزه‌ای و قرمز رنگ مشاهده می‌شود، که به ترتیب خرابی محدود، ایمنی جانی و تخریب تیر می‌باشد.



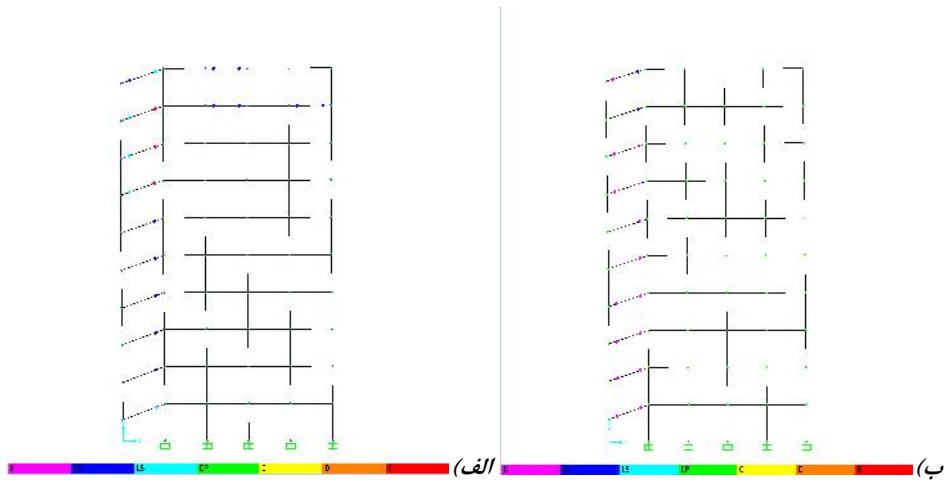
شکل ۱۰: مدل تغییرشکل یافته قاب خمشی بتنی متوسط در سناریو NX. راستای X از سازه



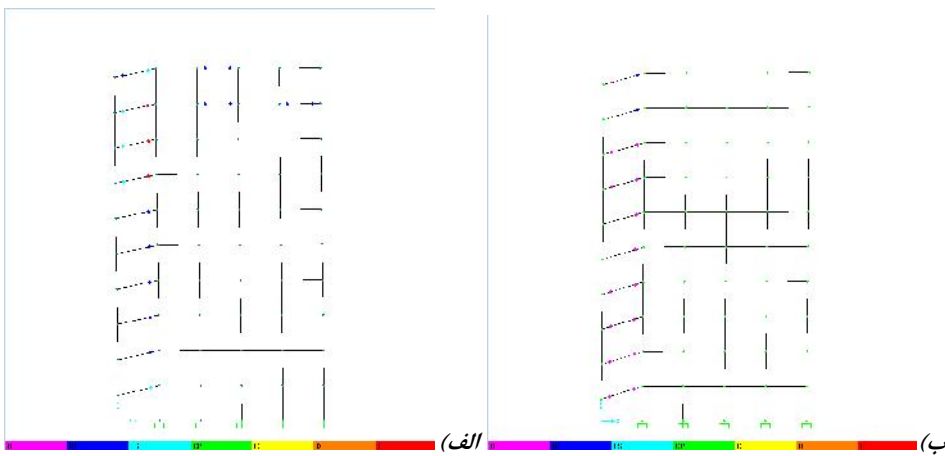
شکل ۱۱: مدل تغییرشکل یافته قاب خمشی بتنی متوسط در سناریو NY. راستای X از سازه



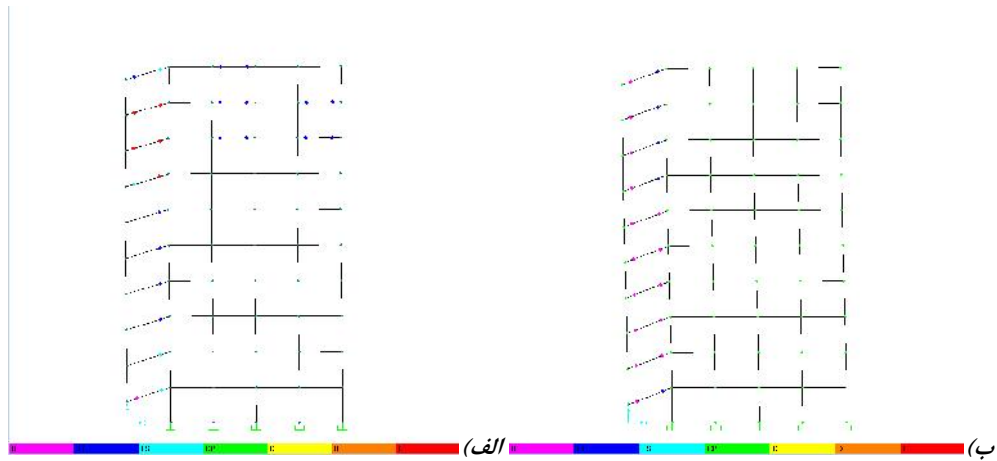
شکل ۱۲- مدل تغییرشکل یافته قاب خمشی بتنی متوسط در سناریو SX. راستای X از سازه



شکل ۱۳: مدل تغییرشکل یافته قاب خمشی بتنی متوسط در سناریو SY، راستای X از سازه



شکل ۱۴: مدل تغییرشکل یافته قاب خمشی بتنی متوسط در سناریو MX، راستای X از سازه



شکل ۱۵: مدل تغییرشکل یافته قاب خمشی بتنی متوسط در سناریو MY، راستای X از سازه

با توجه به مفاصل ایجاد شده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ می‌توان به این نتیجه دست یافت که در سازه مورد مطالعه قاب خمشی ویژه در محدوده قابلیت استفاده بی‌وقفه و قاب خمشی متوسط هر چه از محل حذف ستون به طبقات بالاتر می‌رویم میزان این خرابی‌ها افزایش یافته و در طبقات پایین مشاهده می‌شود که سازه در محدوده‌ی خرابی محدود قرار دارد و در طبقات بالایی سازه دچار تخریب و انهدام شده است. در هر دو سازه در تمامی زلزله‌ها هر دو قاب به همگرایی رسیده‌اند و مفاصلی در تیرها تشکیل شده و در ستون مفصلی مشاهده نمی‌شود. در قاب خمشی ویژه مفاصل ایجاد شده در قسمت حذف ستون قرار دارند ولی در قاب متوسط در دهانه‌های دیگر و خارج از قابی که ستون حذف شده است، نیز مفصل تشکیل شده است.

با بررسی هر شش سناریو در هر شش زلزله مشاهده می‌شود که قاب خمشی ویژه ایمنی جانی ساکنین ساختمان را فراهم می‌سازد ولی



قاب خمشی متوسط در طبقات بالای سازه تیرها تخریب شده و برای ساکنین خطرناک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

- با توجه به مخاطراتی که برای یک سازه می‌تواند اتفاق بیفتد، در نظر گرفتن این مخاطرات برای طراحی یک سازه که حداقل ایمنی جانی برای ساکنین آن فراهم شود، از جمله وظایف طراح آن سازه می‌باشد.
- در این مقاله با ارزیابی تخریب‌پیش رونده بر روی سازه بتنی با شکل‌پذیری متوسط و ویژه در سناریو حذف ستون گوشه در طبقه اول از ساختمان، نتایج زیر را می‌توان نتیجه گرفت:
- در تمامی زلزله‌های وارد شده به ساختمان قاب خمشی ویژه ایمنی جانی ساکنین را تامین می‌کند ولی قاب خمشی متوسط با تخریب تیرهای طبقات بالایی سازه برای ساکنین آن طبقات نا امن بود و خطرات جانی به دنبال دارد.
 - خرابی در سازه‌ای با قاب خمشی متوسط در دهانه‌هایی خارج از ستون حذف شده نیز مشاهده شده است ولی در قاب خمشی ویژه خرابی‌ها در دهانه حذف ستون بوده است، که نشان دهنده این می‌باشد که قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری ویژه نیرو ناشی از حذف ستون را در همان دهانه‌ای که ستون حذف شده است، جذب کرده و برخلاف قاب خمشی بتنی متوسط مانع از انتقال این انرژی به دهانه‌های دیگر قاب شده است.
 - با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق برای یک سازه ۱۰ طبقه با پلان منظم با توجه به عملکرد قاب ویژه در طبقه همکف انتظار می‌رود در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد با توجه به الزامات آیین‌نامه‌ای از این قاب برای ساخت ساختمان‌هایی با اهمیت زیاد استفاده شود.

فهرست مراجع

مرکز تحقیقات و مسکن، آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش سوم.

مقررات ملی ساختمان (۱۳۸۸)، پیش‌نویس مبحث ۲۱، پدافند غیر عامل، ویرایش ششم.

General Service Administration (GSA) (2005). Facilities Standards (P100). Washington, D.C : s.n

R.Shankar Nair (2005) Progressive collapse basics, Modern steel construction, pp.1-3

Unified Facilities Criteria (UFC) (2013) DESIGN OF BUILDINGS TO RESIST PROGRESSIVE COLLAPSE, UFC 4-023-03, Including Change 2 – 1

D. G Lu., P. Y. Song, S. S. Cui, Z. H. Chen (2010) Vertical Incremental Dynamic Analysis for Assessing Progressive Collapse Resistance and Failure Modes of Structures, REC:4th International Workshop on Reliable Engineering Computing, pp:159-172