

## مدلسازی توزیع خرابی پیش رونده لرزه ای در ساختمانهای ۳ طبقه بتن مسلح متقارن و نامتقارن

سمیه کریمیان<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا سروقد مقدم<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> توزیع خرابی، خرابی پیش رونده، تحلیل تاریخچه زمانی، خروج از مرکزیت جرمی، قصاب خمشی بتن مسلح معمولی، سازه های متقارن و نامتقارن.</p>	<p>در این مقاله خرابی پیش رونده به صورت سه بعدی در ساختمانهای ۳ طبقه بتن مسلح متقارن و نامتقارن با خروج از مرکزیتهای جرمی مختلف تحت بار زلزله مدل می شود. بدین نحو که توزیع و گسترش شکست از اولین عضو سازه تا شکست کلیه اعضای ساختمانها با مقایسه و ارزیابی نتایج بدست آمده از تحلیلهای تاریخچه زمانی بررسی می شود. نتایج حاصله حاکی از آن است که توزیع نامتقارن جرم در ساختمانهای پیچشی منجر به تخریب موضعی بیشتر شده که این امر خود سبب تشدید تخریب پیش رونده می گردد. ارزیابی نتایج نشان میدهد که تمرکز شکست بیشتر در مکانی است که تمرکز جرم بیشتری وجود داشته باشد و همچنین توزیع شکست نه در ارتفاع سازه به صورت عمودی بلکه به صورت افقی در طبقات ساختمان رخ می دهد. با افزایش خروج از مرکزیت نه تنها رخداد شروع شکست به سمت لبه نرم سازه نزدیکتر می شود بلکه احتمال رخداد شروع خرابی از ستونها نیز افزایش می یابد. بعلاوه توزیع خرابی مستقل از شتاب نگاشت است و با افزایش خروج از مرکزیت تغییر می کند به گونه ای که می توان سناریوی شکست را در سازه های متقارن و نامتقارن مشابه پیش بینی کرد.</p>

### ۱- مقدمه

نهایی خیلی بیشتر و بزرگتر از خرابی موضعی اولیه خواهد بود [۱].

تعداد بیشماری از بارهای غیر عادی وجود دارد که به طور بالقوه می تواند منجر به خرابی پیش رونده در ساختمانها شود مانند ضربه ناشی از برخورد هواپیما، آتش سوزی، اضافه بارهای تصادفی، خطاهای ساخت و طراحی، انفجار گازها و بمبها، ضربه ناشی از برخورد وسایل نقلیه و مصالح خطرناک و غیره [۲ و ۳]. شبیه سازی عددی خرابی پیش رونده در دیوارهای برشی و قابهای بتن مسلح تحت بار زلزله با استفاده از مدل‌های دارای المانهای پوسته ای چند

خرابی پیش رونده یک سازه عبارتست از توزیع و گسترش خرابی موضعی که منجر به خرابی بخش بزرگی از سازه شود به گونه ای که سیستم سازه ای توانایی تحمل بارهای جانبی و ثقلی را نداشته باشد. در این فرایند خرابی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.karimiyan@iiees.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی زلزله گرایش سازه- پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۲. استادیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

پیش رونده در سازه های کج به دلیل همکاری و مشارکت دیگر المانهای سیستم سازه ای خیلی بیشتر از نوع متقارن آن نمی باشد [۷].

Etouney و همکارانش در سال ۲۰۱۲ از روش مسیر جایگزین برای ارزیابی پتانسیل خرابی پیش رونده ساختمانها استفاده نمودند. بررسی پایداری کلی قابهای خمشی و غیر خمشی مقاوم در برابر بارهای جانبی نشان داد که در نظر گرفتن پاسخ کلی سازه آسیب دیده جهت بررسی مکانیسم خرابی پیش رونده ضروری است. همچنین مکانیسم خرابی پیش رونده باید ناشی از بارهای انفجاری و لرزه ای در ساختمانها بررسی شود [۸].

Helmy و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی خرابی پیش رونده در سازه ۱۰ طبقه بتن مسلح بر مبنای دستورالعمل UFC پرداختند. بدین ترتیب که به حذف ستونهای گوشه، میانی و کناری و همچنین حذف دیوارهای برشی میانی و کناری در ساختمان پرداختند. نتایج حاصل از تحلیلهای عددی نشان داد که جهت طراحی اقتصادی، اثرات دالها باید در محاسبات سازه پس از حذف ستون در نظر گرفته شود. همچنین نتایج حاکی از آن است که سازه های بتن مسلح طراحی شده بر مبنای آئین نامه ACI شرایط و محدودیتهای دستورالعمل UFC را پوشش نمی دهند. بنابراین این سازه ها دارای پتانسیل خرابی پیش رونده زیادی ناشی از حذف دیوار و ستون می باشند [۹].

Gurley در سال ۲۰۱۲ به بررسی مقاومت لرزه ای سازه ها در برابر خرابی پیش رونده و همچنین بررسی مکانیسمهای شکست از طریق مقایسه مکانیسمهای با دو دهانه در دستورالعمل GSA و مکانیسم شکست خمشی در مهندسی زلزله ناشی از حذف ستون تحت بار انفجار پرداخت. نتایج نشان داد که آسیب ناشی از زلزله می تواند مانند بارهای انفجاری منجر به حذف المانهای باربر از سیستم سازه ای شود. بنابراین بررسی خرابی پیش رونده ناشی از زلزله از اهمیت زیادی برخوردار است. بررسی جزئیات شکل پذیری برای دهانه های شامل ستونهای

لایه ای و المانهای تیر فایبری در سال ۲۰۰۸ انجام شد. شبیه سازی رفتار غیر خطی المانهای سازه ای، شامل رفتار پرودیک تحت کوپل نیروی محوری- ممان خمشی و نیروی برشی و فروپاشی المانهای سازه ای در حالات حدی و برخورد بین المانهای سازه ای در طول شکست بود [۵و۴].

در سال ۲۰۱۱ مدل‌های صفحه ای در مقایسه با مدل‌های سه بعدی با فرضیات مختلفی در شبیه سازی با هم مطالعه و مقایسه شدند. در این تحقیق تعدادی از ساختمانهای ۱۰ طبقه فولادی با استفاده از ماکرو مدل‌های صفحه ای و سه بعدی طراحی لرزه ای شدند. در اینجا حالت دو بعدی و سه بعدی سیستمهای سازه ای ناشی از حذف آبی ستونها بررسی شد. در این تحقیق ۴ تیپ مدل با روشهای مختلف شبیه سازی جهت بررسی خرابی پیش رونده استفاده شد. نتایج حاکی از این بود که سیستم سقف اثرات چشم گیر و موثری بر روی توزیع پاسخ شکست در ماکرو مدل‌های سه بعدی دارد. در ارزیابی خرابی پیش رونده به دلیل اثرات توزیع سیستم سقفها، مدل‌های سه بعدی در مقایسه با مدل‌های دو بعدی ارزشمندتر و محافظه کارانه تر ارزیابی شدند [۶].

مکانیسم خرابی پیش رونده در سازه های متقارن و نامتقارن ناشی از حذف آبی ستونها با طراحی ۳۰ مدل سازه ای متقارن و کج یکبار با هسته های مهاربند و بار دیگر با هسته های بتن مسلح در سال ۲۰۱۱ ارزیابی شد. نتایج آنالیز مدل‌های سازه ای کج نشان داد که تغییرات در ظرفیت مقاومت در برابر خرابی پیش رونده بستگی به مکان ستونهای حذف شده دارد. پتانسیل خرابی پیش رونده در سازه های کج هنگامیکه مکان ستون حذف شده در قسمت کج ساختمان باشد افزایش می یابد. تشکیل مفاصل پلاستیک در دهانه های ستونهای حذف شده و همچنین دهانه های مجاور نشان داد که در سیستم سازه ای، دیگر المانها نیز جهت مقاومت در برابر خرابی پیش رونده درگیر شده و هنگام حذف عضو سازه ای در تحمل بارهای موجود مشارکت می کنند. بنابراین پتانسیل خرابی

داد که تیرهای موجود در قابها در مقاومت در برابر خرابی پیش رونده مشارکت می کنند. ناکافی بودن سختی جانبی در ستونها سبب توزیع شکست به صورت افقی در طبقات می شود. بررسی اثرات دالها و ترازهای مختلف طراحی لرزه ای نشان داد که عملکرد زنجیره ای، مقاومت در برابر خرابی پیش رونده ساختمانهای بتن مسلح را افزایش میدهد [۱۳].

Lin و Tsai در سال ۲۰۰۸ به بررسی رابطه بین مقاومت لرزه ای ساختمانهای بتن مسلح و پتانسیل خرابی پیش رونده بر مبنای دستورالعمل GSA پرداختند. نتایج تحلیلهای استاتیکی خطی و استاتیکی و دینامیکی غیر خطی ناشی از حذف ستون ها در مکانهای مختلف ساختمان نشان داد که معیارهای GSA برای دو تحلیل غیر خطی باید متفاوت در نظر گرفته شود. ضریب تقویت دینامیکی مساوی ۲ سبب می شود که تحلیل استاتیکی غیر خطی محافظه کارانه باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در نظر گرفتن ضریب تقویت دینامیکی جهت لحاظ نمودن اثرات دینامیکی غیر خطی در روش خطی GSA ضروری است. بدین ترتیب می توان مکانیسم خرابی پیش رونده را در سازه های بتن مسلح ناشی از حذف ستون پیش بینی کرد [۱۴]. مهرداد ساسانی در سال ۲۰۰۸ به بررسی خرابی پیش رونده ناشی از حذف آبی ستون در یک سازه به روش آزمایشگاهی پرداخت. بدین ترتیب که رفتار یک تیر محیطی ممتد را در یک قاب بتن مسلح با مقیاس ۳/۸ ناشی از حذف ستون در آزمایشگاه بررسی کرده و سپس جهت اعتبار سنجی نتایج و ارزیابی رفتار تیر در تغییر شکل های بزرگ، همین تیر را با نرم افزار المان محدود Ansys بررسی نمود و در نهایت به بررسی کل رفتار سازه در یک مدل غیر خطی سه بعدی با استفاده از المانهای تیر ستون و المانهای پوسته پرداخت. بدین ترتیب پتانسیل خرابی پیش رونده در تیر و سازه و همچنین باز توزیع نیروها ناشی از حذف ستون در حالت آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه و ارزیابی شد [۱۵].

حذف شده نشان داد که طراحی در برابر بارهای لرزه ای و استفاده از مکانیسمهای با دو دهانه در نواحی حذف ستون می تواند مقاومت سیستم سازه ای را در برابر خرابی پیش رونده بهبود بخشد [۱۰].

در سال ۲۰۱۲ ساختمان فدرال Alfred P. Murrah و ساختمانهای مقابل آن که در سال ۱۹۹۵ آسیب دیده بودند بار دیگر بر مبنای آئین نامه های طراحی لرزه ای اخیر، با استفاده از سیستمهای دیوارهای برشی داخلی و قابهای خمشی ویژه مطالعه شدند. همچنین قاب خمشی بتنی معمولی موجود در مقابل ساختمان مذکور نیز بر اساس آئین نامه های جدید دوباره مدل شد. سپس بار انفجاری معادل بار انفجاری وارد شده در سال ۱۹۹۵ به سازه ها اعمال شد. نتایج نشان داد که تمامی ملاحظات تقویتی اعمال شده در کاهش خرابی پیش رونده موثر واقع شدند، بجز دیوارهای برشی داخلی. به عبارت دیگر تقویت المانهای خارجی سازه ها مقاومت سازه ها را در برابر خرابی پیش رونده افزایش داد در حالی که تقویت المانهای داخلی تاثیر چندانی در کاهش پتانسیل خرابی پیش رونده نداشتند [۱۱].

Sagiroglu و Sasani در سال ۲۰۱۲ پتانسیل خرابی پیش رونده یک سازه ۶ طبقه بتن مسلح را ناشی از حذف دو ستون مجاور خارجی از طریق بررسی باز توزیع نیروها و تغییرات نیروی محوری مطالعه نمودند. در بررسی خرابی پیش رونده، عملکرد ویرندال به عنوان مکانیسم مهمی در باز توزیع نیروها شناخته شد. تغییرات مشاهده شده در جهت ممانهای خمشی تیرهای مجاور ستونهای حذف شده حاکی از وجود تنش کششی بزرگی در میلگردهای پایین تیر در محل اتصال به ستون بود که منجر به شکست ترد موضعی به دلیل عدم مهار مناسب میلگردها شد [۱۲].

روش مسیر جایگزین در دو تیپ دال درجا ریخته و دال غیر یکپارچه با مقاومتهای مختلف لرزه ای جهت ارزیابی خرابی پیش رونده توسط آقای Yi و همکارانش در سال ۲۰۱۱ استفاده شد. نتایج تحلیلهای تاریخچه زمانی نشان

تخمین میزان حاشیه ایمنی در سازه های متقارن و نامتقارن در برابر تخریب پیش رونده با مقایسه میزان و نحوه خرابی در سازه های متقارن و نامتقارن توسعه و یا پیشنهاد ضوابط جدید آئین نامه ای جهت محدود کردن خطر خرابی پیش رونده لرزه ای در ساختمانهای قاب خمشی متقارن و نامتقارن به گونه ای که حاشیه ایمنی در سازه های نامتقارن در برابر خرابی پیش رونده به سازه های متقارن نزدیک شود.

تخمین رابطه میزان نامنظمی در پلان با تغییر پتانسیل خرابی پیش رونده

مقایسه آسیب پذیری تیبهای مختلف سازه های متقارن و نامتقارن و تعیین آسیب پذیر ترین سازه ها با وجود تعداد بیشمار رخداد شکست سازه ها ناشی از بار زلزله در گذشته، چگونگی گسترش و توزیع شکست در المانهای سازه ای در ارزیابی سازه ها و طراحی لرزه ای به طور واضح بررسی نشده است. زیرا سطح شکست سازه به طور سنتی مرحله ای فرض می شد که اولین المان از سازه به مرحله خرابی و خسارت برسد یا به عبارت دیگر از معیار پذیرش جلوگیری از شکست المان تجاوز کند. به این ترتیب خرابی اولین المان از سازه به عنوان خرابی کل سازه تلقی می گردید و به این نکته اصلا توجه نمی شد که خرابی پیش رونده است یا خیر. در این مطالعه گسترش خرابی و چگونگی توزیع شکست در ساختمانها ناشی از بار زلزله با ادامه دادن تحلیل تاریخچه زمانی حتی تا هنگامیکه چندین المان از سازه از حالت حدی شکست تجاوزکنند مطالعه و بررسی شده است. بنابراین وجه تمایز این پژوهش با دیگر مطالعات انجام شده بررسی چگونگی و نحوه گسترش شکست به صورت سه بعدی ناشی از بار زلزله و پیچش در سازه هاست که تا کنون مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته است.

زلزله های گذشته نشان داده است که پیچش در پلان ساختمانهای نامتقارن به طور معمول با تمرکز خرابی در یک طرف سازه ها همراه است. بنابراین انتظار می رود که پیچش در سازه های نامتقارن پتانسیل خرابی پیش رونده

Cui و Pekau در سال ۲۰۰۵ به بررسی مکانیسم خرابی پیش رونده در دیوار برشی پیش ساخته ۱۲ طبقه با ۳ دهانه ناشی از بار زلزله به روش المانهای مجزا پرداختند. نتایج بررسی تقاضای شکل پذیری در اتصالات مکانیکی و تحلیلهای صورت گرفته نشان داد که این دیوارهای برشی در صورتی که طراحی لرزه ای شده باشند می توانند به صورت خودکار تقاضای لغزش برشی در اتصالات افقی و شکل پذیری برشی در اتصالات عمودی را تامین کنند [۱۶].

تحقیقات بیشمار دیگری نیز در زمینه مکانیسم خرابی پیش رونده ناشی از حذف ستون تحت بار انفجار یا ضربه صورت گرفته است [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲]. در حالیکه خرابی پیش رونده ناشی از بارگذاری زلزله تا کنون مطالعه و بررسی نشده است.

نوآوریهای این تحقیق عبارت است از:

مدلسازی چگونگی پیشرفت و گسترش خرابی در المانهای سازه ای، یکی پس از دیگری، در ساختمانهای قاب خمشی بتن مسلح تحت بار زلزله برای نخستین بار تفاوت این تحقیق با دیگر مطالعات انجام شده در بارگذاری زلزله در این است که تاکنون در تحلیلهای مرسوم لرزه ای ملاک خاتمه تحلیلها و مطالعات، رسیدن اولین المان از سازه به مرحله خرابی و خسارت بوده است در حالیکه در این مطالعه، گسترش و چگونگی توزیع خرابی در دیگر المانهای سازه ای نیز مطالعه و بررسی می شود.

بررسی تاثیر میزان نامتقارنی در پلان ساختمانها که در این تحقیق خروج از مرکزیت جرمی می باشد در نحوه گسترش و پیشرفت خرابی در ساختمانهای قاب خمشی توسعه روشهای مدلسازی و تحلیل جهت بررسی موضوع تخریب پیش رونده لرزه ای

پیشنهاد الگوهای رفتاری توزیع خرابی، جهت پیش بینی تخریب پیش رونده لرزه ای در سازه های متقارن و نامتقارن

طراحی به ترتیب ۵/۳ و KN/m<sup>2</sup> ۱/۹۶ و ضریب برش پایه طرح ۰/۲۱۵۹ در نظر گرفته شد. سپس با توزیع نامتقارن جرم در جهت X در سقفهای طبقات، سه سازه نامتقارن دیگر ایجاد شد. بدین ترتیب که در یک سازه خروج از مرکزیت جرمی یکسان ۵ درصد و در دو سازه دیگر خروج از مرکزیت جرمی یکسان ۱۵ درصد و در نهایت ۲۵ درصد به منظور بررسی حالت حدی نامنظمی، جهت مقایسه سازه ها ایجاد شد. لبه نزدیکتر به مرکز جرم لبه نرم و لبه دورتر به مرکز جرم لبه سخت تعریف می شود. شایان ذکر است که در این ۴ مدل سازه ای اثر میانقابها در نظر گرفته نشده است.

بدین ترتیب می توان آسیب پذیری را برای تیپهای مختلف سازه های متقارن و نامتقارن بررسی و تعیین نمود که کدام تیپ از سازه های نامتقارن آسیب پذیرتر هستند. برای سیستم سقف دو حالت وجود دارد. سقف انعطاف پذیر و سقف صلب. متغیر مهم در این پژوهش اثر نامتقارنی (پیچش) در سقف است در صورتی که سقف انعطاف پذیر باشد اثر پیچش در نتایج تاثیری نخواهد داشت و نتایج تحلیلها به حالت دو بعدی که قبلا توسط آقای Haselton در سالهای ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ بررسی شده است نزدیک خواهد شد. در این تحقیق از آنجا که بررسی بیشترین اثر پیچش در سازه مد نظر است، سقف باید به صورت دیافراگم صلب در نظر گرفته شود. سیستم سقف در این تحقیق نیز به صورت دیافراگم صلب مدل شده است. به گونه ای که در سازه های متقارن جرم سقف به صورت متمرکز و مساوی در گره های سقف توزیع شده است. در سازه های نامتقارن توزیع جرمهای متمرکز در گره های سقف در دو قاب سمت چپ بیشتر از دو قاب سمت راست و به گونه ای است که ضمن ایجاد خروج از مرکزیت های ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد، مجموع جرمها در سازه های متقارن با سازه های نامتقارن برابر باشد. شکل ۱ نمایی از مدل‌های سازه ای و توزیع تیپیک جرمهای متمرکز را در سقفهای سازه متقارن و نامتقارن با خروج از مرکزیت ۱۵ درصد نشان می دهد.

را افزایش دهد. در این مطالعه برای ارزیابی اثرات عدم تقارن در پتانسیل خرابی پیش رونده لرزه ای ساختمانهای کوتاه مرتبه، یک سری سازه ۳ طبقه متقارن و نامتقارن بتن مسلح با قاب خمشی معمولی در نظر گرفته شده است. همانطور که میدانیم ساختمانهای سنتی و ضعیف بی شماری در ایران و بسیاری از کشورها موجود است که مستعد شکست می باشند. از طرف دیگر همانطور که گفته شد هدف این تحقیق بررسی پتانسیل خرابی پیش رونده در سازه هاست و می دانیم که احتمال رخداد شکست در سازه های با قاب خمشی معمولی بیشتر از سازه های با قاب خمشی متوسط و ویژه است. بنابراین با توجه به تعداد زیاد ساختمانهای قدیمی و ضعیف، ارزیابی ساختمانهای با قاب خمشی معمولی در مقایسه با ساختمانهای با قاب خمشی متوسط و ویژه از اهمیت بیشتری برخوردار است. به همین دلیل سازه های با قاب خمشی معمولی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. گر چه در ادامه این پژوهش، در تحقیقات آتی نزدیک، توزیع شکست در قابهای خمشی متوسط و ویژه نیز مطالعه و بررسی خواهد شد.

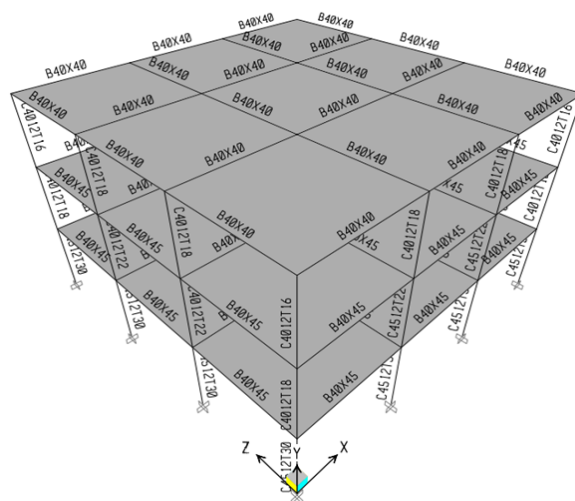
در این پژوهش، ابتدا یک سازه متقارن بر اساس آئین نامه (۲۰۰۵) ACI طراحی شده و سپس با در نظر گرفتن خروج از مرکزیت‌های جرمی به میزان ۰/۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ در همان مدل سازه ای متقارن، گونه نامتقارن مدل‌های ساختمانی لحاظ گردیده است. در نهایت این مدلها تحت شتاب نگاشتهای دو مولفه ای تحلیل و بررسی شده اند.

ساختمان مبنای مطالعه:

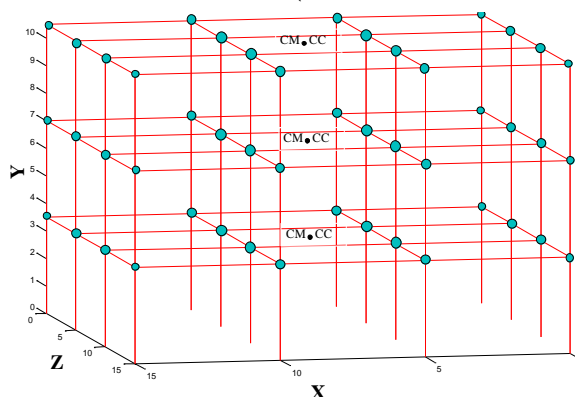
مدلهای انتخابی در این مطالعه ۴ سازه متقارن و نامتقارن سه بعدی سه طبقه سه دهنه قاب خمشی بتن مسلح معمولی با ارتفاع طبقات ۳/۵ متر و طول دهانه تیرها ۵ متر می باشد. مشخصات مدل‌های مورد مطالعه به نحوی انتخاب شد که نتایج حاصل از این تحلیلها برای طیف وسیعی از ساختمانهای متداول قابل تعمیم باشند. روال کار بدین شرح است که ابتدا ۱ سازه متقارن بر اساس آئین نامه (۲۰۰۵) ACI طراحی شد. بار مرده و زنده

در اینجا جهت شبیه سازی مناسب شکست در سازه ها به گونه ای که توزیع مرحله به مرحله شکست امکانپذیر باشد استفاده از یک منحنی رفتاری مناسب ضروری است. لذا منحنی رفتاری اصلاح شده ایبارا - کراوینکلر (۲۰۰۵) جهت مدلسازی شکست کلی سازه های بتن مسلح در نظر گرفته شده است. شکل ۲ منحنی رفتاری مبنای اصلاح شده ایبارا - کراوینکلر را نشان می دهد. با استفاده از این منحنی رفتاری مدلسازی رفتار کرنش-نرم شدگی مرتبط با خرد شدگی بتن، کماتش میلگرد و شکست بتن و گسیختگی پیوستگی امکانپذیر است [۲۳].

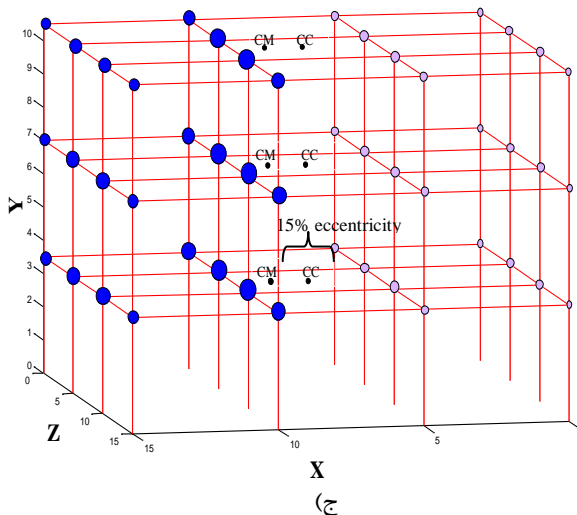
دلیل استفاده از مفاصل پلاستیک به جای المانهای فایبری این است که مدل‌های با المانهای فایبری نمی توانند کرنش-نرم شدگی مرتبط با کماتش میلگردها را شبیه سازی کنند. بنابراین قادر به شبیه سازی شکست خمشی قابهای بتن مسلح نمی باشند [۲۳ و ۲۴ و ۲۵].



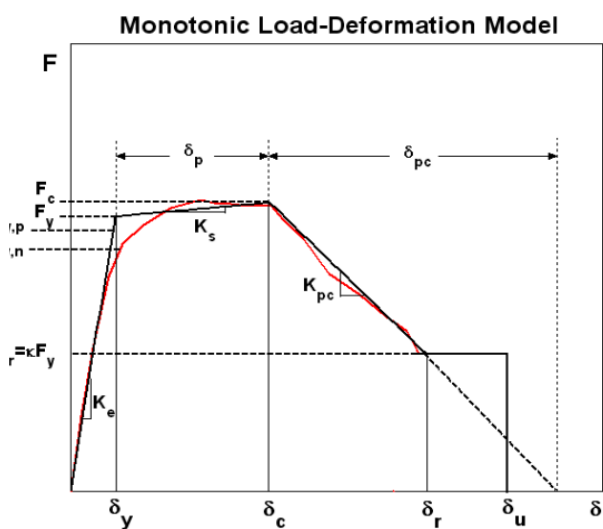
(الف)



(ب)



(ج)



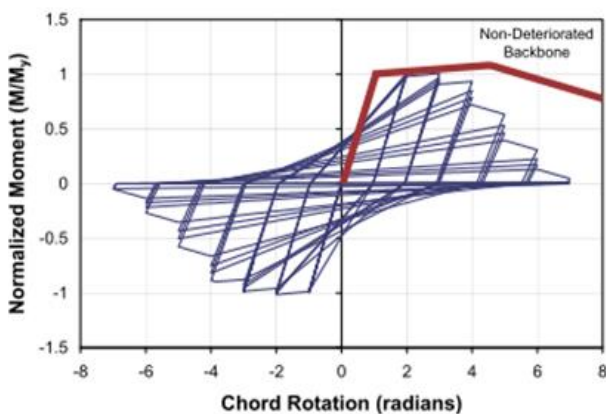
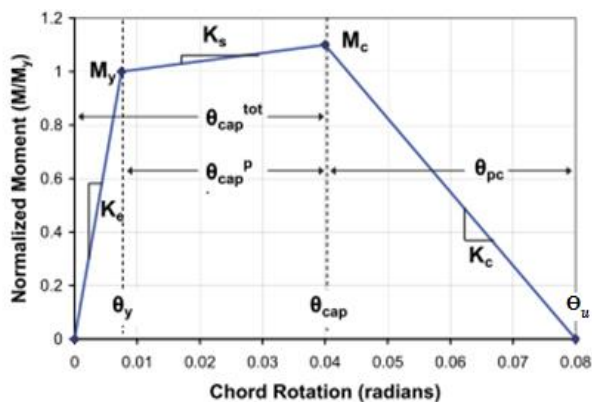
شکل ۲: منحنی مبنای اصلاح شده ایبارا-

کراوینکلر [۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱].

- δC : تغییر شکل نقطه ماکزیمم که برای بارگذاری یکنواخت متناظر با مقاومت ماکزیمم است
- Fy : مقاومت تسلیم موثر با در نظر گرفتن سخت شدگی کرنشی میانگین
- δy : تغییر شکل تسلیم موثر
- Kc : سختی الاستیک موثر

شکل ۱: (الف) نمایی از مدل‌های سازه ای،  
 (ب) توزیع تیبیک جرمهای متمرکز در سقف متقارن  
 (ج) توزیع تیبیک جرمهای متمرکز در سقف سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت ۱۵ درصد

شود و تحلیل بدون وجود آن ادامه می یابد تا از اعضای باقیمانده تیر و ستون، دومین المان به مقدار  $\Theta_u$  مربوطه اش برسد و از سازه حذف شود و تحلیل به همین ترتیب ضمن همگرا بودن محاسبات ادامه می یابد تا هنگامیکه آنالیز تاریخیچه زمانی به اتمام برسد و یا اینکه سازه ناپایدار شود. پس از این، منظور از مفصل شکست یافته، مفصلی است که مقدار  $\Theta$  آن بزرگتر یا مساوی میزان  $\Theta_u$  باشد که این امر متناظر با این مفهوم است که مقدار تحمل بار مفصل به صفر رسیده است. در مدل‌های سازه‌های برای هر عضو تیر و ستون هر کدام دو مفصل در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: رفتار یکنواخت و هیستریزیس مفاصل تعریف شده ایبارا-کراوینکلر استفاده شده در این مطالعه [۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴].

Fr : ظرفیت مقاومت باقیمانده  
 $\delta r$ : تغییر شکل در مقاومت باقیمانده  
 $\delta u$ : ظرفیت تغییر شکل نهایی  
 $\delta p$ : ظرفیت تغییر شکل پلاستیک در بارگذاری یکنواخت  
 $\delta pc$ : ظرفیت تغییر شکل پس از نقطه ماکزیمم در بارگذاری یکنواخت  
 $F_{yp}$ : مقاومت تسلیم موثر پیش بینی شده از خصوصیات تجربی مصالح  
 $F_{yn}$ : مقاومت تسلیم موثر اسمی پیش بینی شده از خصوصیات اسمی مصالح  
 $\kappa = Fr/F_y$ : نسبت مقاومت باقیمانده  
 $F_c$ : مقاومت نقطه ماکزیمم با در نظر گرفتن سخت شدگی کرنشی میانگین

همانطور که شکل ۲ نشان می دهد برای شبیه سازی شکست سازه ای پارامتر  $K$  باید صفر در نظر گرفته شود. همچنین بر اساس منحنی اصلاح شده نشان داده شده در شکل ۳ مقاومت صفر متناظر با مقدار  $\Theta_u$  می باشد. با صفر نمودن  $K$  در تعریف منحنی رفتاری المانها در مدل اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر به این مفهوم خواهیم رسید که هر المان در حین بارگذاری جانبی پس از اینکه مقاومتش صفر شد، ضمن همگرا بودن محاسبات و ادامه تحلیل، از سازه حذف می شود و تحلیل در سازه بدون المان مذکور و با سیستم سازه ای باقیمانده ادامه می یابد تا سازه طبق شاخص خرابی تعریف شده که در منحنی اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر مقدار  $\Theta_u$  برای هر عضو میباشد به شکست کامل برسد. زیرا طبق شکل منحنی رفتاری اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر، مقدار تحمل بار در مفاصل متناظر با  $\Theta_u$  صفر میباشد و این بدین معنی است که به محض اینکه مقدار  $\Theta$  در مفاصل به میزان  $\Theta_u$  برسد تحمل بار المان نیز صفر شده و این به معنای حذف عضو در سازه است. به عبارت دیگر هنگام تحلیل تاریخیچه زمانی هنگامیکه اولین مفصل به مقدار  $\Theta_u$  مربوطه اش رسید به طور خودکار آن عضو از مدل سازه ای حذف می

سپس هرکدام از سازه های متقارن و نامتقارن تحت شتاب نگاشتهای دو مولفه ای پیشنهاد شده در دستورالعمل Fema-p695 جدول A-4C نشان داده شده در جدول ۱ آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی شدند.

جدول ۱: خلاصه ای از داده های اطلاعاتی استفاده شده PEER NGA و پارامترهای ثبت شده شتاب نگاشتهای حوزه دور، استفاده شده در این مطالعه [۶].

ID No.	PEER-NGA Record Information				Recorded Motions	
	Records Seq. No.	Lowest Freq (Hz.)	File Names – Horizontal Record		PGA max (g)	PGV max (cm/s.)
			Component 1	Component 2		
1	953	0.25	NORTHR/MUL009	NORTHR/MUL279	0.52	63
2	960	0.13	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270	0.48	45
3	1602	0.06	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090	0.82	62
4	1787	0.04	HECTOR/HEC000	HECTOR/HEC090	0.34	42
5	169	0.06	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352	0.35	33
6	174	0.25	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230	0.38	42
7	1111	0.13	KOBE/NIS000	KOBE/NIS090	0.51	37
8	1116	0.13	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090	0.24	38
9	1158	0.24	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270	0.36	59
10	1148	0.09	KOCAELI/ARC000	KOCAELI/ARC090	0.22	40
11	900	0.07	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360	0.24	52
12	848	0.13	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR	0.42	42
13	752	0.13	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090	0.53	35
14	767	0.13	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090	0.56	45
15	1633	0.13	MANJIL/ABBAR--L	MANJIL/ABBAR--T	0.51	54
16	721	0.13	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090	0.36	46
17	725	0.25	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360	0.45	36
18	829	0.07	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360	0.55	44
19	1244	0.05	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N	0.44	115
20	1485	0.05	CHICHI/TCU045-E	CHICHI/TCU045-N	0.51	39
21	68	0.25	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180	0.21	19
22	125	0.13	FRIULI/A-TMZ000	FRIULI/A-TMZ270	0.35	31

شده و جهت پاسخ به معادلات غیرخطی نیز الگوریتم نیوتن در نظر گرفته شده است.

### توزیع خرابی در ساختمانهای متقارن و نامتقارن:

جهت بررسی روند توزیع خرابی و گسترش شکست در خرابی پیش رونده تحت شتاب نگاشتهای پیشنهاد شده در دستورالعمل FEMA P695، پس از تحلیل تاریخیچه زمانی در سازه های ۳ طبقه متقارن و نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد، ترتیب خرابی اعضا یا به عبارت دیگر سناریوی خرابی در هر سازه بررسی

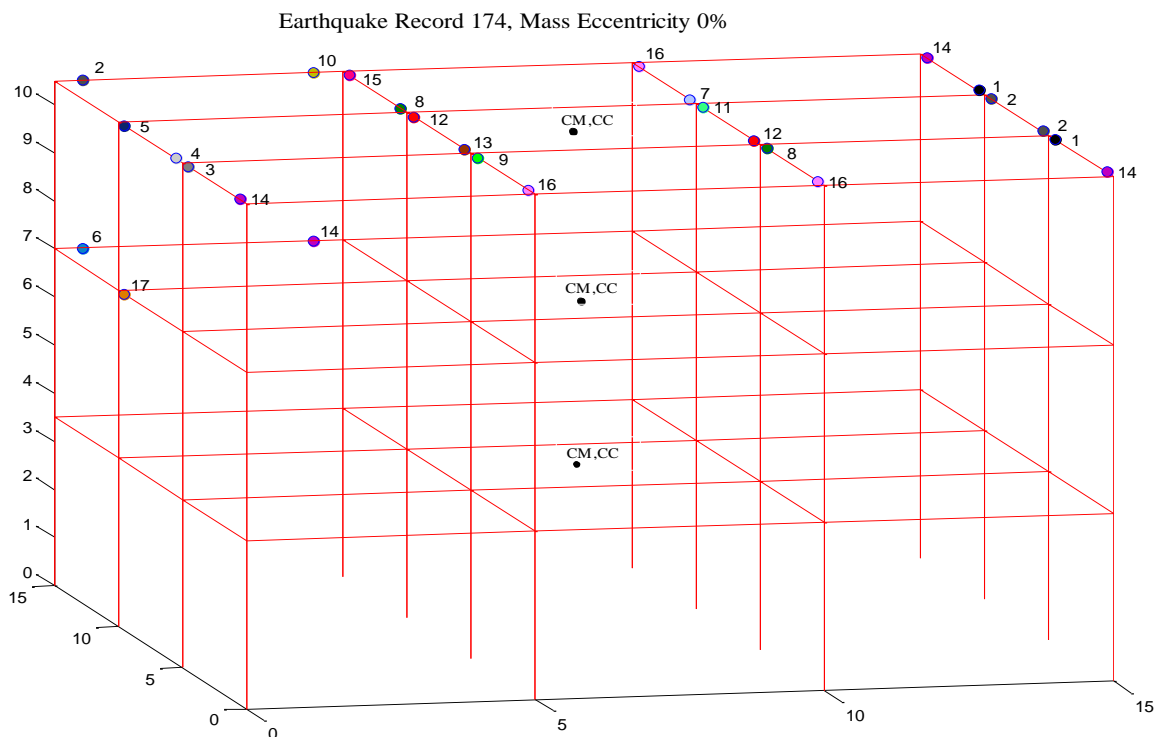
از آنجائی که هدف بررسی روند توزیع و گسترش خرابی در مدل‌های انتخابی است شتاب نگاشتهای مذکور جهت اعمال اثر شدید بار زلزله به سازه و شکست المانهای تیر و ستون یکی پس از دیگری و در نتیجه افزایش احتمال شکست در کل سازه به شتاب حدودا ۱g تا ۳g همپایه شدند [۶].

این شتاب نگاشتها به صورت دو مولفه افقی در راستای X و Z به سازه اعمال شده اند. در کلیه تحلیل‌های تاریخیچه زمانی مولفه قویتر زلزله در راستای Z به سازه اعمال شده است. نرم افزار مورد استفاده (ورژن ۲،۲،۲) OPENSEES است. در تحلیل تاریخیچه زمانی از روش نیومارک به عنوان روش غیر خطی حل معادلات استفاده



رکوردها مشابه می باشد به گونه ای که می توان ضمن پیش بینی اعضای بحرانی، ترتیب و توزیع خرابی را نیز در سازه های مشابه پیش بینی نمود. به عنوان نمونه توزیع خرابی در شکل های ۴، ۵، ۶ و ۷ بر اساس جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ که ترتیب شکست رخ داده در مفاصل سازه های متقارن و نامتقارن ناشی از شتاب نگاشت ۱۷۴ را ارائه می کند به ترتیب نشان داده شده است.

گردید. بدین صورت که ترتیب خرابی از اولین المان تیر یا ستون یکی پس از دیگری تا هنگامی که سازه ناپایدار شود و یا تحلیل تاریخچه زمانی به اتمام رسد بررسی شد و در نهایت سناریوی خرابی برای هر کدام از ساختمانهای متقارن و نامتقارن ارائه و المانهای بحرانی تیر و ستون مشخص گردید. نتایج نشان می دهد نه تنها نقاط شروع خرابی و اعضای بحرانی تیر و ستون در بسیاری از شتاب نگاشتها تکراری است بلکه روال خرابی نیز در بسیاری از



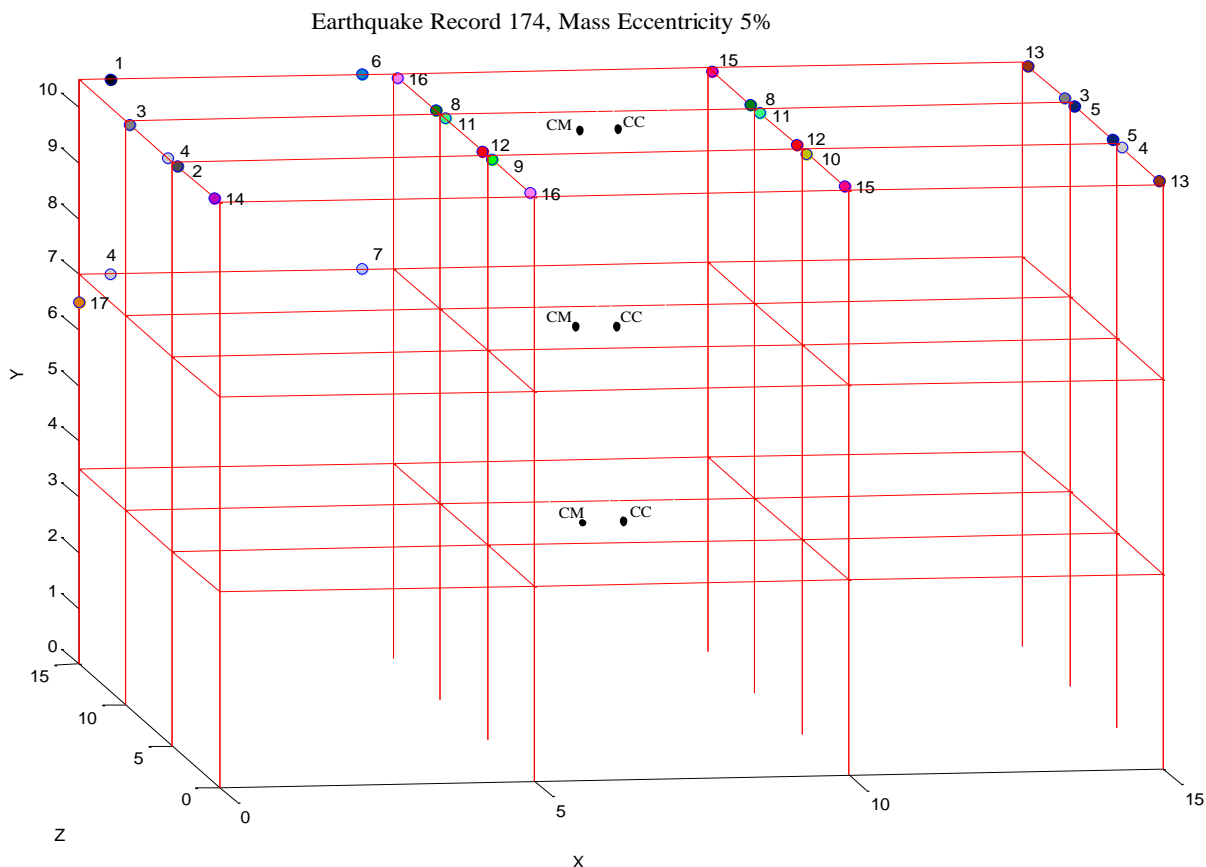
شکل ۴: توزیع شکست در سازه متقارن ناشی از شتاب نگاشت ۱۷۴

جدول ۲: ترتیب مفاصل شکست یافته و مختصات آنها در سازه متقارن ناشی از شتاب نگاشت ۱۷۴

ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z
1	15	10.5	10.5	7	10	10.5	10.5	14	4.5	7	15
1	15	10.5	4.5	8	5	10.5	10.5	14	15	10.5	14.5
2	0.5	10.5	15	8	10	10.5	4.5	14	0	10.5	0.5
2	15	10.5	9.5	9	5	10.5	4.5	14	15	10.5	0.5
2	15	10.5	5.5	10	4.5	10.5	15	15	5	10.5	14.5
3	0	10.5	4.5	11	10	10.5	9.5	16	10	10.5	14.5
4	0	10.5	5.5	12	5	10.5	9.5	16	5	10.5	0.5
5	0	10.5	9.5	12	10	10.5	5.5	16	10	10.5	0.5
6	0.5	7	15	13	5	10.5	5.5	17	0	7	9.5

بیرونی (مفاصل ۷، ۸، ۹) به محیط داخلی (مفاصل ۱۱، ۱۲ و ۱۳) در مرزهای بالا و پائین به اتمام می رسد. به اتمام می رسد.

همانطور که شکل ۴ و جدول ۲ نشان می دهد شروع خرابی در لبه های سمت چپ و راست (مفاصل ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) طبقه سوم رخ میدهد و پس از توزیع در هسته مرکزی از محیط



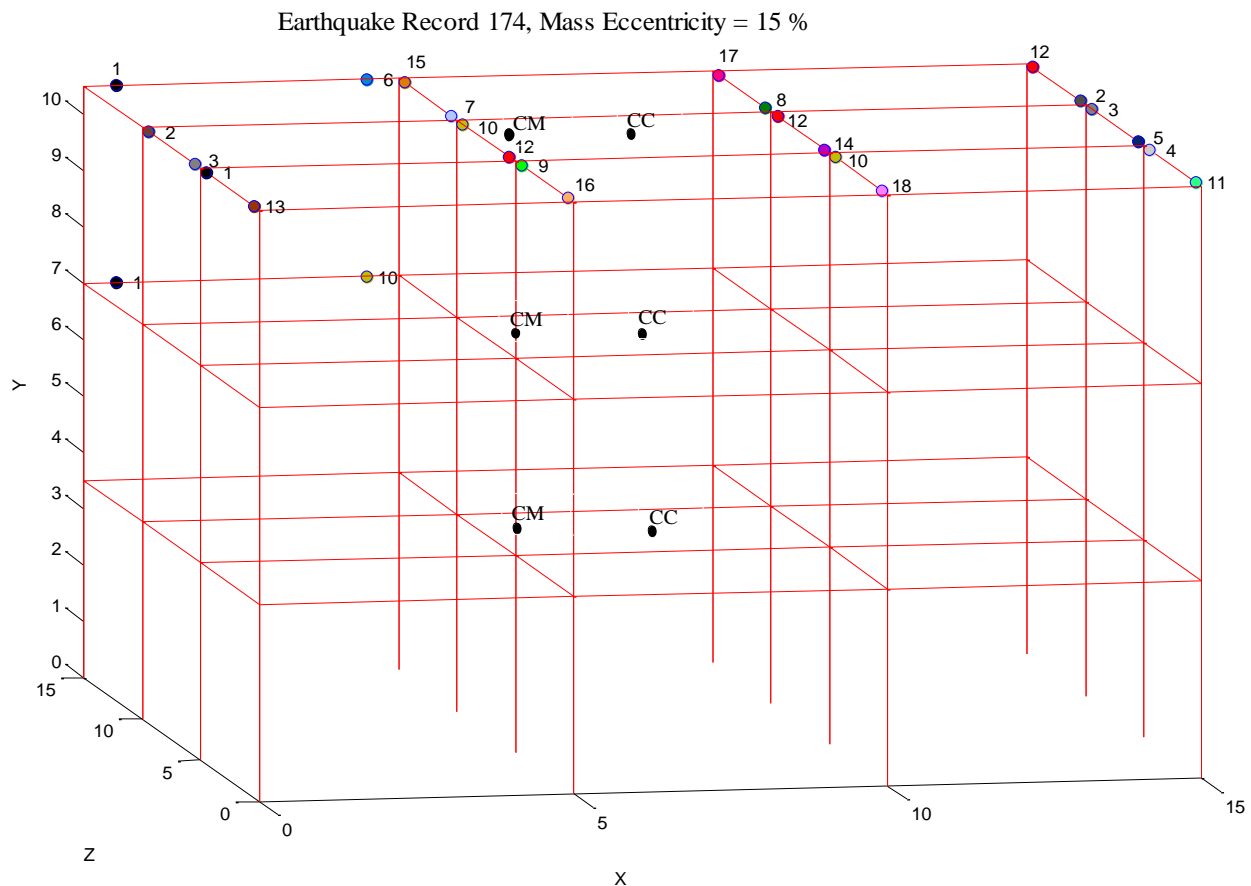
شکل ۵: توزیع شکست در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۷۴

جدول ۳: ترتیب مفاصل شکست یافته و مختصات آنها در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۷۴

ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z
1	0.5	10.5	15	6	4.5	10.5	15	12	10	10.5	5.5
2	0	10.5	4.5	7	4.5	7	15	13	15	10.5	14.5
3	0	10.5	9.5	8	5	10.5	10.5	13	15	10.5	0.5
3	15	10.5	10.5	8	10	10.5	10.5	14	0	10.5	0.5
4	0.5	7	15	9	5	10.5	4.5	15	10	10.5	14.5
4	0	10.5	5.5	10	10	10.5	4.5	15	10	10.5	0.5
4	15	10.5	4.5	11	5	10.5	9.5	16	5	10.5	14.5
5	15	10.5	9.5	11	10	10.5	9.5	17	0	6.5	15
5	15	10.5	5.5	12	5	10.5	5.5				

از توزیع خرابی در ناحیه مرکزی از مرز بیرونی به مرز داخلی در لبه بالا و پائین به اتمام می رسد.

بر اساس شکل ۵ و جدول ۳ در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۵ درصد، مشابه با سازه متقارن خرابی در طبقه سوم در لبه های سمت چپ و راست آغاز شده و پس



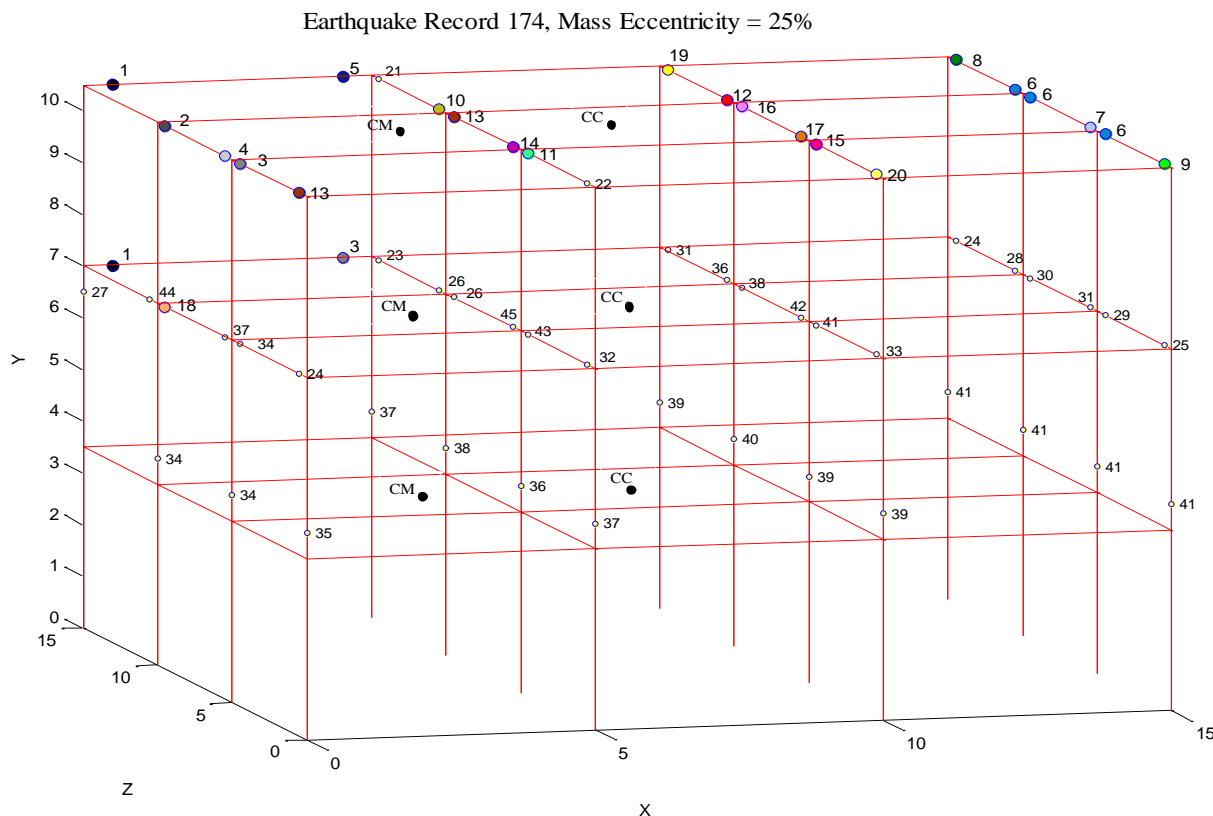
شکل ۶: توزیع شکست در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد ناشی از رکورد ۱۷۴

جدول ۴: ترتیب مفاصل شکست یافته و مختصات آنها در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۷۴

ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z
1	0.5	7	15	6	4.5	10.5	15	12	10	10.5	9.5
1	0.5	10.5	15	7	5	10.5	10.5	12	5	10.5	5.5
1	0	10.5	4.5	8	10	10.5	10.5	13	0	10.5	0.5
2	0	10.5	9.5	9	5	10.5	4.5	14	10	10.5	5.5
2	15	10.5	10.5	10	4.5	7	15	15	10	10.5	14.5
3	15	10.5	9.5	10	5	10.5	9.5	16	10	10.5	0.5
3	0	10.5	5.5	10	10	10.5	4.5	17	5	10.5	14.5
4	15	10.5	4.5	11	15	10.5	0.5				
5	15	10.5	5.5	12	15	10.5	14.5				

بر اساس شکل ۶ و جدول ۴ خرابی در طبقه سوم در لبه نرم (مفاصل ۱،۲ و ۳) آغاز شده و پس از توزیع در لبه سخت (مفاصل ۴،۳، ۵ و ۲) و سپس لبه داخلی سمت چپ

در لبه داخلی سمت راست (مفاصل ۱۰،۹،۷،۱۲،۱۵ و ۱۶)، در لبه داخلی سمت راست (مفاصل ۱۲،۱۴،۱۷،۸،۱۰ و ۱۸) سقف به اتمام می رسد



شکل ۷: توزیع شکست در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۲۵ درصد ناشی از رکورد ۱۷۴

جدول ۵: ترتیب مفاصل شکست یافته و مختصات آنها در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۲۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۷۴

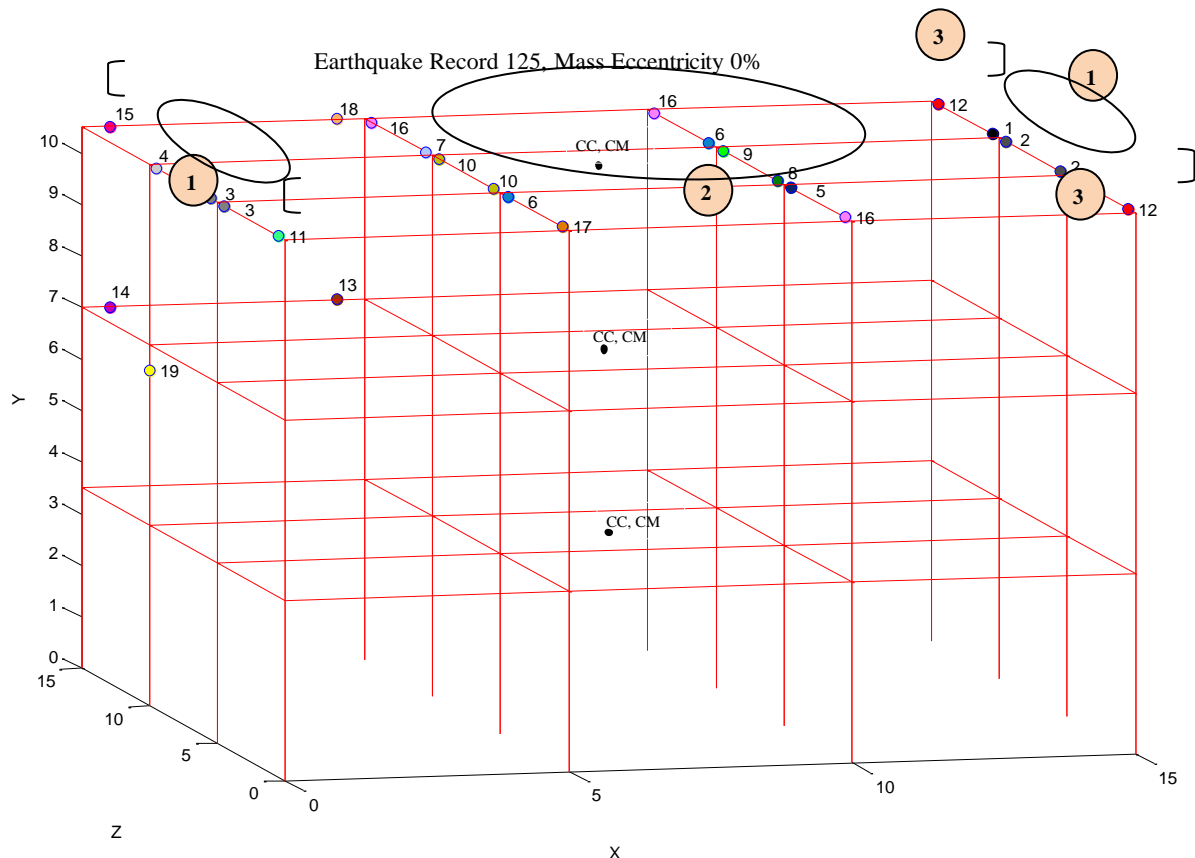
ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z	ترتیب شکست مفاصل	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z
1	0.5	7	15	6	15	10.5	4.5	14	5	10.5	5.5
1	0.5	10.5	15	7	15	10.5	5.5	15	10	10.5	4.5
2	0	10.5	9.5	8	15	10.5	14.5	16	10	10.5	9.5
3	4.5	7	15	9	15	10.5	0.5	17	10	10.5	5.5
3	0	10.5	4.5	10	5	10.5	10.5	18	0	7	9.5
4	0	10.5	5.5	11	5	10.5	4.5	19	10	10.5	14.5
5	4.5	10.5	15	12	10	10.5	10.5	20	10	10.5	0.5
6	15	10.5	9.5	13	5	10.5	9.5	21	5	10.5	14.5
6	15	10.5	10.5	13	0	10.5	0.5	22	5	10.5	0.5

نگاشتها نیز صورت گرفت و ترتیب شکست مفاصل و متعاقبا اعضای تیر و ستون و یا به عبارت دیگر توزیع شکست در المانها یکی پس از دیگری بر اساس خرابی فرض شده در منحنی اصلاح شده ایبارا - کراوینکلر در ساختمانهای متقارن و نامتقارن بررسی گردید. بدین

همانطور که شکل ۷ و جدول ۵ نشان میدهد توزیع خرابی در طبقه سوم مشابه با سازه متقارن و سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد است. همچنین مشاهده می شود که خرابی از لبه نرم به سمت لبه سخت سازه توزیع می گردد. همین روال برای دیگر شتاب

توزیع شکست بسته به میزان خروج از مرکزیت جرمی تقریباً یک روال مشخص و ویژه ای را دنبال می کند. بر اساس مشاهدات به عمل آمده در شتاب نگاشتهای مختلف اگر بخواهیم نحوه توزیع شکست در سازه های متقارن را به صورت خلاصه ارائه کنیم خرابی در هر سقف به طور همزمان در یالهای چپ و راست بیرونی رخ می دهد. سپس در هسته مرکزی سقف از بیرون هسته به سمت داخل هسته ادامه داشته و در نهایت در دو یال دیگر به اتمام می رسد. به عنوان مثال توزیع خرابی در سازه متقارن ناشی از رکورد ۱۲۵ در شکل ۸ نشان داده شده است.

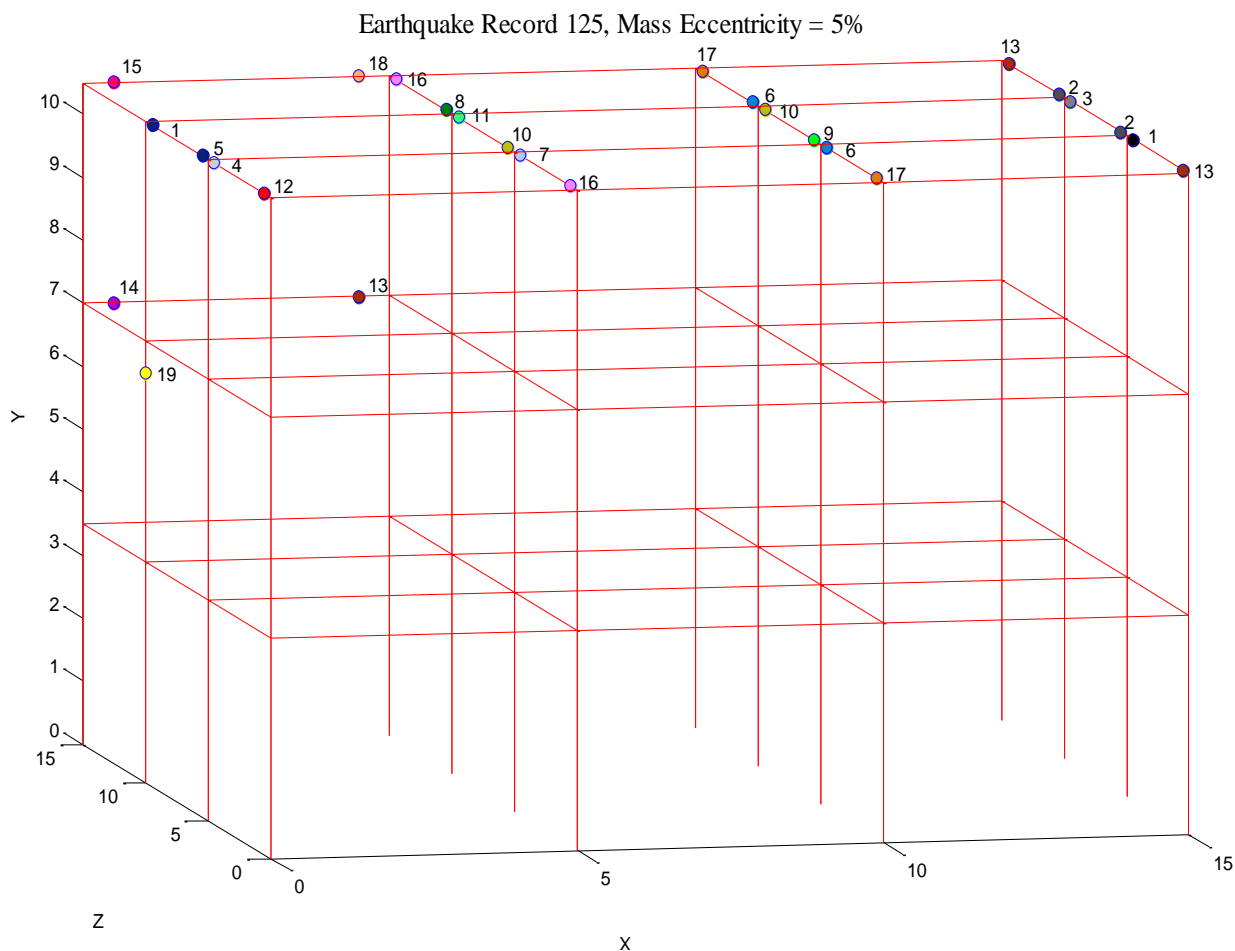
ترتیب که برای درک بهتر از مفاصل بحرانی تشکیل شده و ترتیب شکست المانهای تیر و ستون، برای هرکدام از شتاب نگاشتها مفاصل فوق را به صورت سه بعدی ترسیم کرده و با مشاهده و مقایسه شکلها مشاهده گردید که توزیع شکست در سازه های متقارن و نامتقارن از یک روال خاص پیروی می کند به گونه ای که می توان در سازه های مشابه همین روند توزیع خرابی را پیش بینی و سناریوی خرابی را در اعضای تیر و ستون ارائه کرد. به عبارت دیگر توزیع شکست مستقل از شتاب نگاشتها رخ می دهد و نه تنها نقاط شروع خرابی و متعاقباً اعضای بحرانی بعدی در بسیاری از رکوردها مشابه می باشد بلکه



شکل ۸: توزیع خرابی در سازه متقارن ناشی از شتاب نگاشت ۱۲۵

طبقات نیز توزیع خرابی از بیرون هسته به سمت داخل می باشد. به عنوان مثال توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۲۵ در شکل ۹ نشان داده شده است.

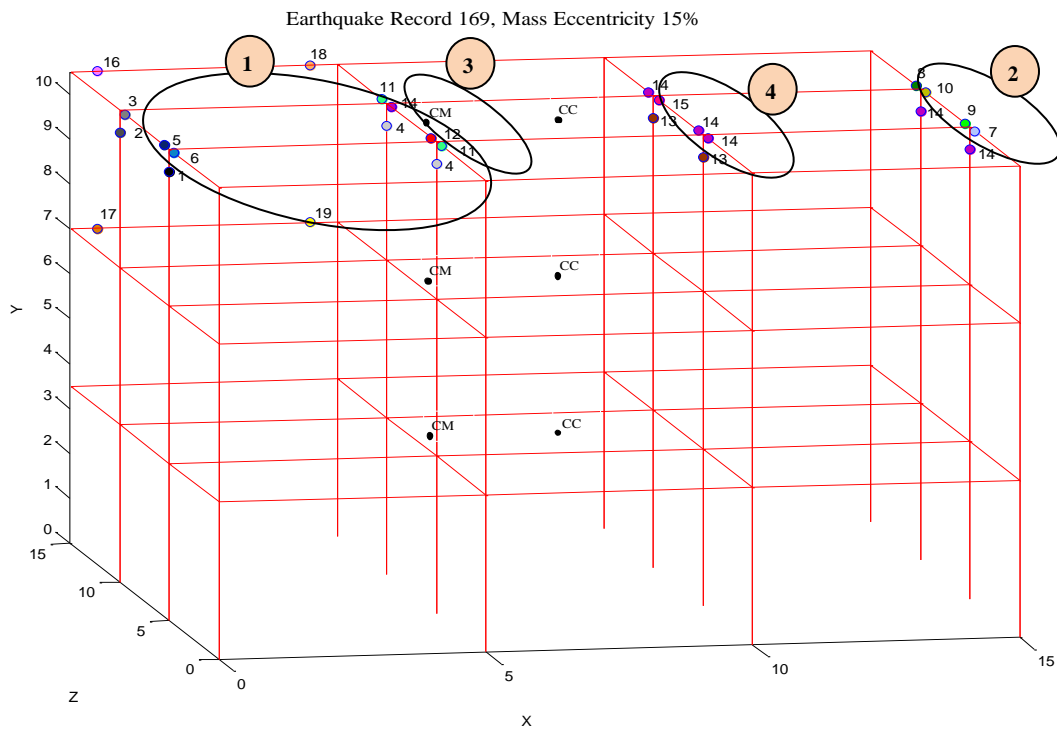
اگر بخواهیم توزیع خرابی را در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۵ درصد به صورت خلاصه بیان کنیم در بیشتر شتاب نگاشتها رفتار سازه مشابه با رفتار سازه متقارن است البته در برخی رکوردها ناحیه نرم خرابی بیشتری نسبت به سازه متقارن دارد. در هسته مرکزی



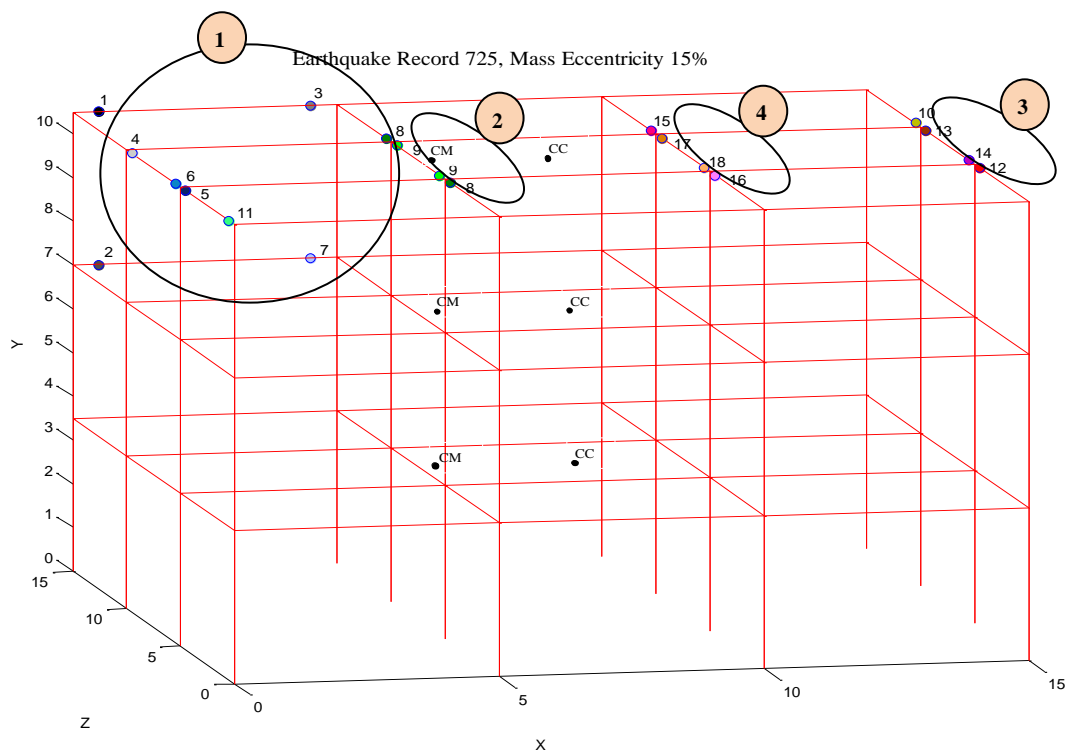
شکل ۹: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۲۵

به سمت داخل رخ میدهد. ترتیب مفاصل تشکیل شده حاکی از آن است که در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد توزیع خرابی به دو صورت رخ می دهد. به عنوان نمونه دو فرایند خرابی مذکور که ناشی از دو رکورد ۱۶۹ و ۷۲۵ می باشد در دو شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد به صورت خلاصه بدین شرح است که شروع خرابی در ناحیه نرم می باشد و از آنجا که مرکز جرم نیز در ناحیه نرم است می توان نتیجه گرفت که خرابی در ناحیه ای رخ می دهد که تمرکز جرم بیشتری وجود دارد. توزیع خرابی در هسته مرکزی طبقات نیز از بیرون هسته



شکل ۱۰: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۶۹



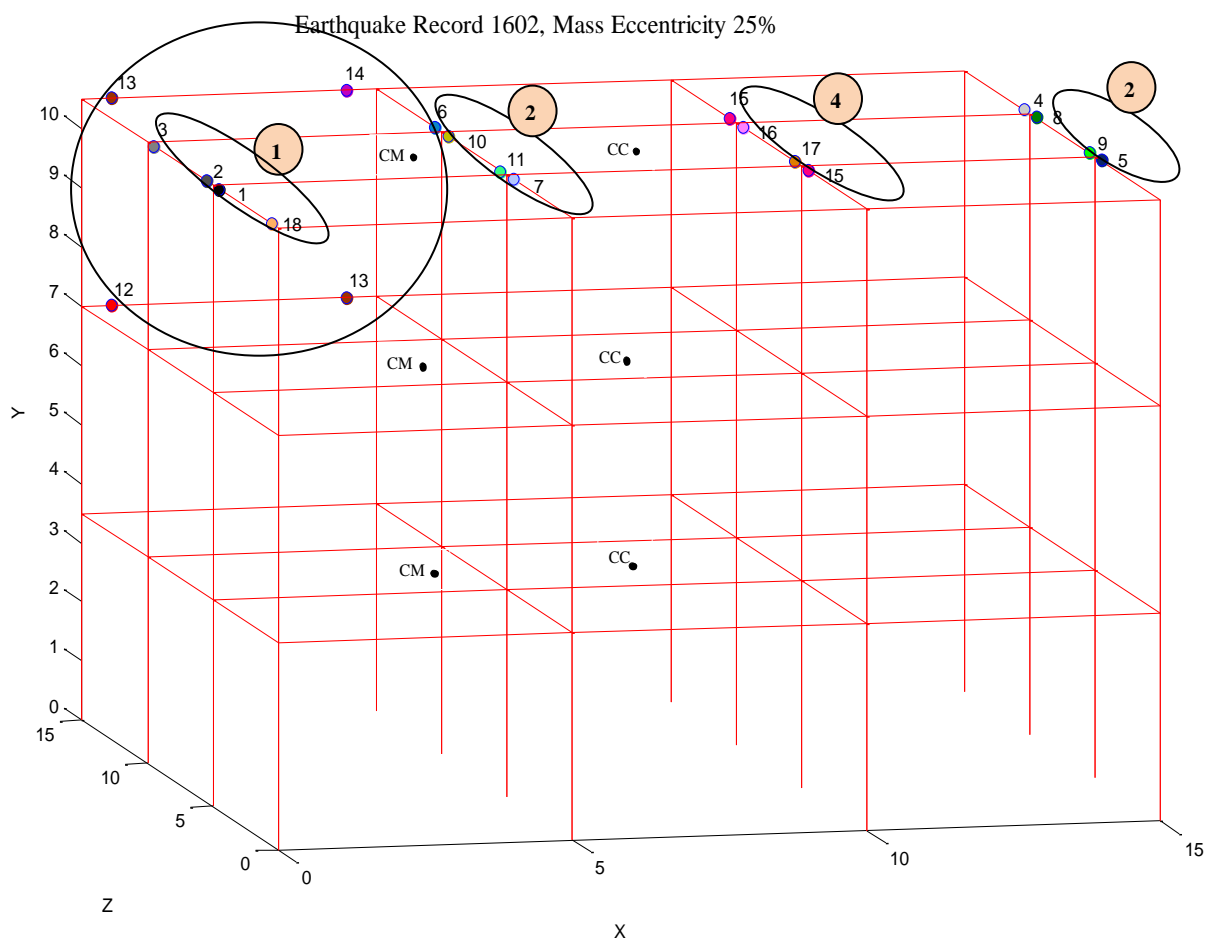
شکل ۱۱: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۷۲۵

توزیع خرابی مشابه با سازه های نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد است. در ۲۰ رکورد، نقطه شروع خرابی در سمت چپ سازه یا ناحیه نرم است که این

اگر بخواهیم توزیع خرابی را در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۲۵ درصد به صورت خلاصه بیان کنیم می توان گفت در بیشتر شتاب نگاشتهای تحلیل شده

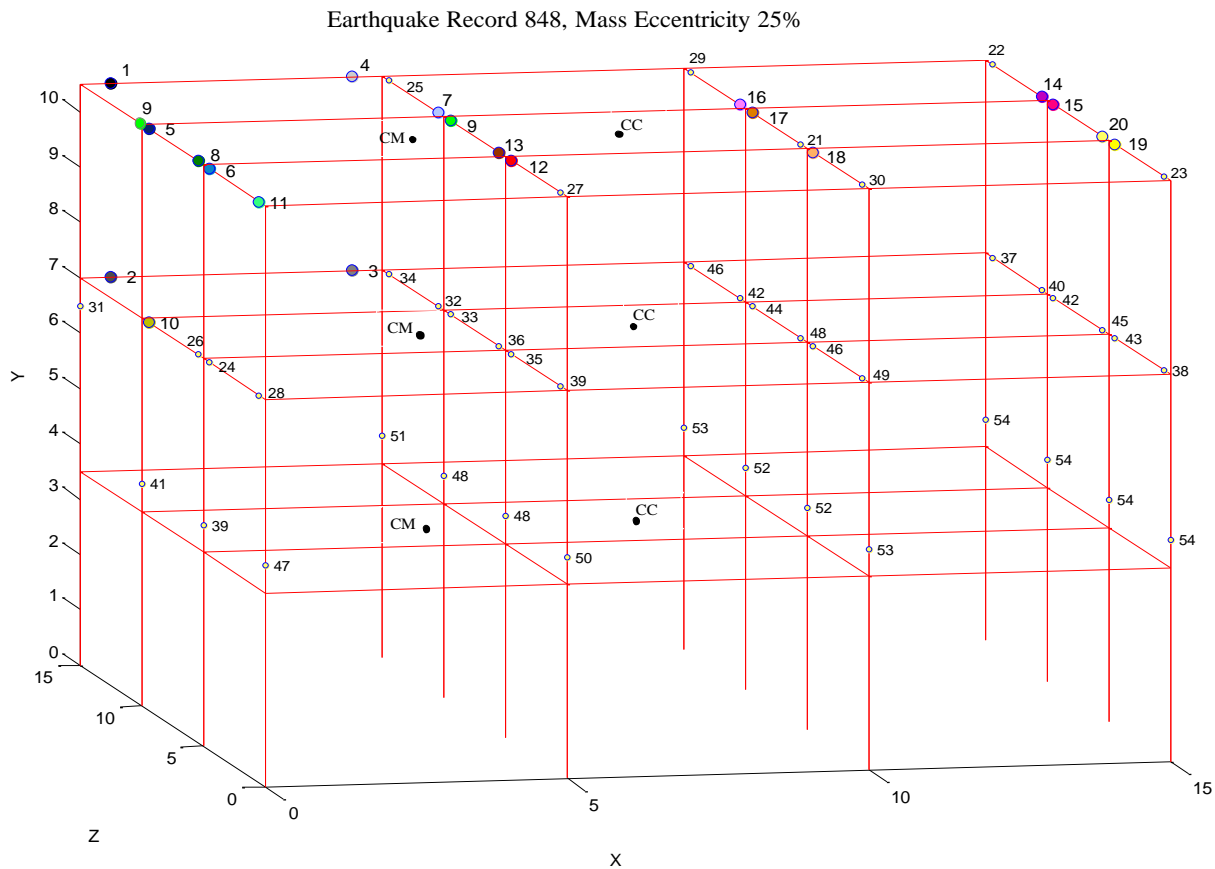
یا به عبارت دیگر توزیع خرابی از لبه نرم به سمت لبه سخت پیش می رود. در نیمی از موارد توزیع خرابی را در هر سه طبقه داریم و در نیم دیگر توزیع خرابی فقط در طبقه سوم رخ داده است. شکلهای ۱۲ و ۱۳ توزیع خرابی را در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۲۵ درصد نشان میدهند

موضوع با توجه به اینکه جرم در سمت چپ متمرکز است بیانگر این امر است که نقطه شروع خرابی و همچنین توزیع خرابی در نزدیکی مرکز جرم رخ می دهد. به عبارت دیگر خرابی در جایی بیشتر است که تمرکز جرم بیشتری وجود دارد. توزیع خرابی در طبقات نشان میدهد که در هر طبقه توزیع خرابی از سمت چپ به سمت راست است.



شکل ۱۲: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۲۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۱۶۰۲



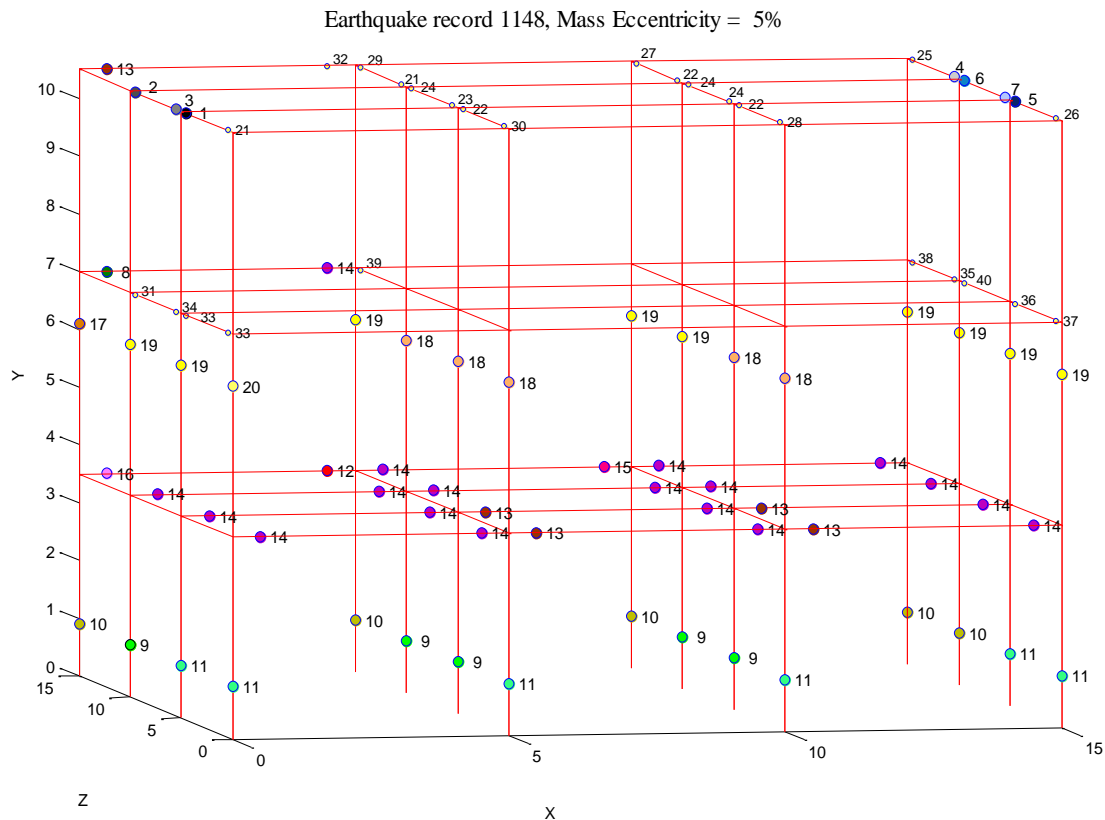


شکل ۱۳: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۲۵ درصد ناشی از شتاب نگاشت ۸۴۸

درصد موارد هنگامی که آخرین مفصل شکست یافته در هر طبقه در مفاصل موجود در قابهای میانی رخ دهد شروع خرابی در طبقه بعدی در مفاصل موجود در قابهای میانی است به عبارت دیگر هنگامیکه شکست در هر طبقه در قابهای میانی به اتمام برسد شروع تخریب در طبقه بعدی در قابهای میانی است و به همین ترتیب هنگامیکه شکست در قابهای بیرونی طبقه تمام شود شروع خرابی در طبقه بعدی در قابهای بیرونی رخ میدهد. به عنوان مثال توزیع خرابی در رکورد ۱۱۴۸ در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت ۵٪ در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همانطور که پیشتر گفته شد با توجه به انتخاب قاب خمشی معمولی و شتابهای با  $PGA$  بالا جهت افزایش احتمال تخریب هر چه بیشتر سازه مشاهده می شود که در برخی شتاب نگاشتها مفاصل شکست یافته فقط در طبقه سوم شکل گرفته و هیچ گونه تخریبی در طبقه اول و دوم رخ نداده است. رکوردهایی نیز وجود دارند که ناشی از آنها هیچ شکستی در سازه رخ نداده است.

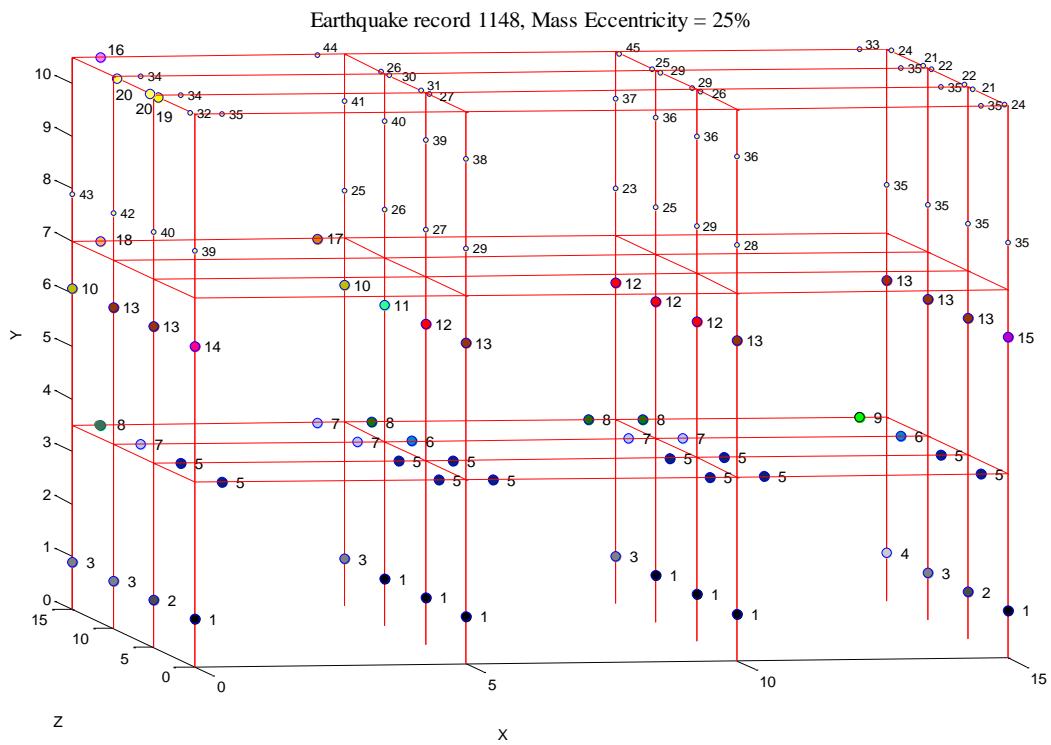
بر اساس مشاهدات به عمل آمده از روند توزیع خرابی در ساختمانهای ۳ طبقه متقارن و نامتقارن که تخریب در هر سه طبقه سازه رخ داده است مشاهده گردید که در ۸۰٪



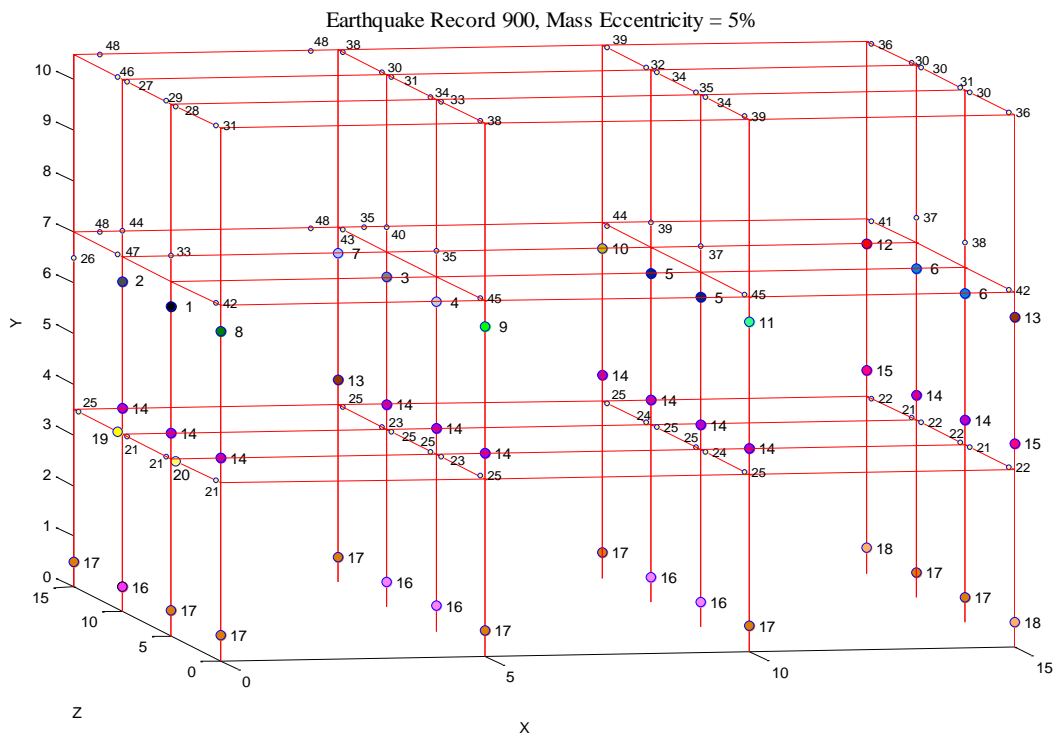
شکل ۱۴: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت ۵٪ ناشی از شتاب نگاشت ۱۱۴۸

شود و یا اینکه در حالت دوم پس از سقف سوم، خرابی از پایه ستونها به سمت بالا توزیع خواهد شد. ولی وقتی شروع خرابی از ستون است شروع توزیع خرابی از هر قسمتی از سازه می تواند باشد مثلاً توزیع خرابی از پایه ستونها شروع و به نقاط بالای سازه منتقل شده و در برخی دیگر از موارد شروع توزیع خرابی از وسط سازه بوده که به بقیه نقاط سازه در قسمتهای مختلف منتقل گردیده است و ... که در مجموع ۱۸ درصد موارد را شامل می شود. در بقیه موارد یا شکستی در سازه رخ نداده است و یا اینکه تعداد مفاصل شکست یافته کمتر از آن است که در طبقه بندیهای فوق قرار گیرد. به عنوان مثال در شکل‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ فرایند توزیع خرابی با توجه به نقطه شروع خرابی در تیر و ستون قابل بررسی است.

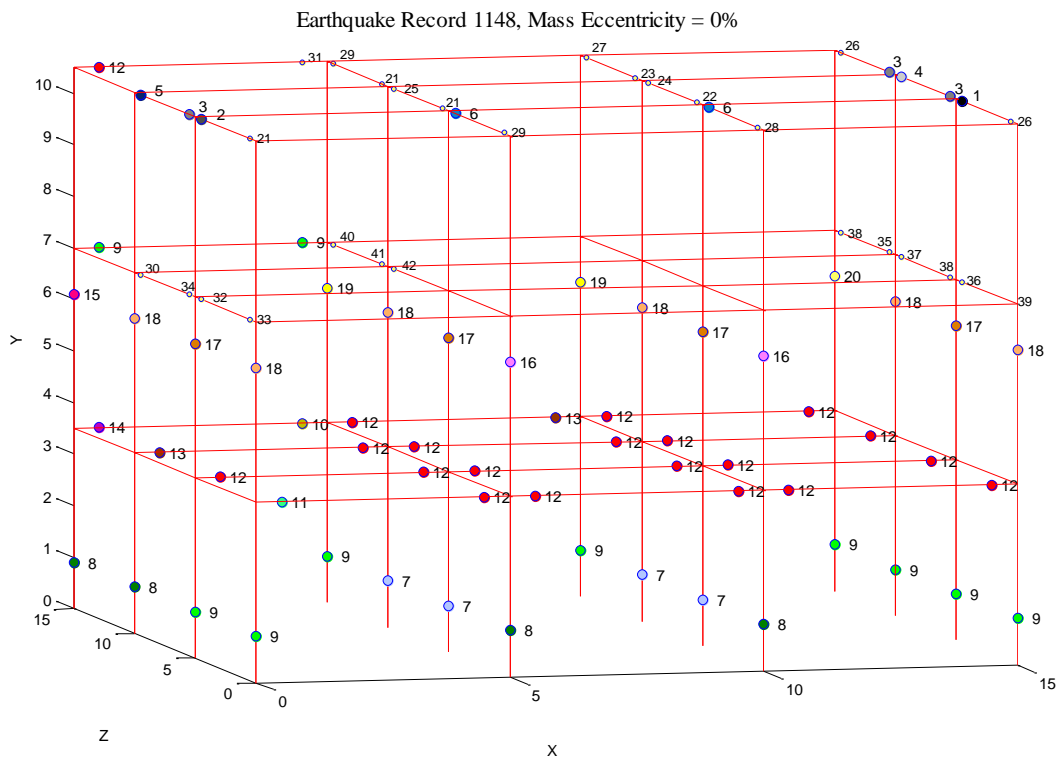
بررسی نتایج و مشاهدات درخصوص احتمال رخداد نقاط شروع شکست در تیرها یا ستونها نشان میدهد که در سازه های متقارن و نامتقارن با خروج از مرکزیت ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد به ترتیب در ۹٪، ۱۸٪، ۲۳٪ و ۲۳٪ موارد خرابی از ستونها شروع شده و در مابقی حالات شروع شکست از تیر هاست. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که احتمال رخداد شروع شکست در تیرها بیشتر از ستونهاست و همچنین با افزایش پیچش در پلان ساختمانها احتمال شروع خرابی از ستون ها بیشتر می شود. به طور کل درخصوص نحوه توزیع خرابی در سازه های متقارن و نامتقارن نتایج نشان می دهد که وقتی شروع خرابی از تیر است در ۷۰ درصد موارد توزیع خرابی از سقف طبقه سوم شروع شده و پس از توزیع در سقف سوم دو حالت رخ می دهد. در حالت اول خرابی پس از سقف سوم به بقیه نقاط سازه به سمت پایین منتقل می



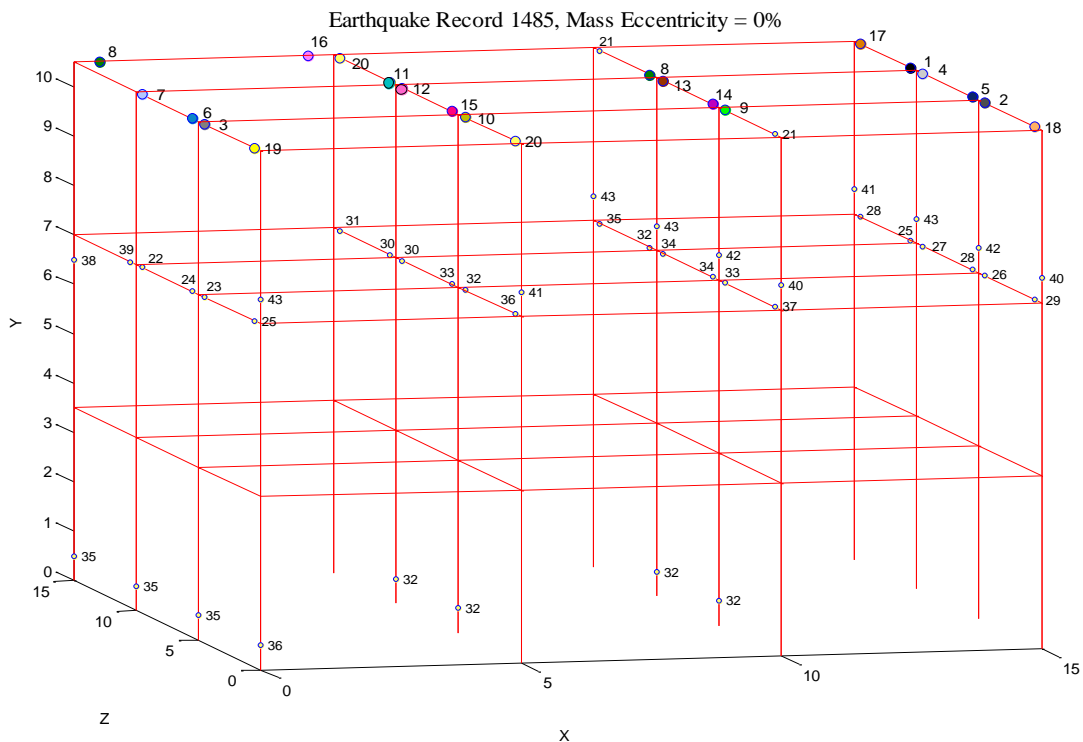
شکل ۱۵: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت ۲۵٪ ناشی از شتاب نگاشت ۱۱۴۸



شکل ۱۶: توزیع خرابی در سازه نامتقارن با خروج از مرکزیت ۵٪ ناشی از شتاب نگاشت ۹۰۰



شکل ۱۷: توزیع خرابی در سازه متقارن ناشی از شتاب نگاشت ۱۱۴۸



شکل ۱۸: توزیع خرابی در سازه متقارن ناشی از شتاب نگاشت ۱۴۸۵

کمانش میلگرد و شکست بتن و گسیختگی پیوستگی امکانپذیر است [۲۳ و ۲۴ و ۲۵].

با توجه به بررسی توزیع شکست در کلیه تحلیل‌های تاریخچه زمانی انجام شده، مشاهده می‌شود که در بیشتر تحلیل‌ها، شکست فقط در تیرها رخ داده است (حدوداً ۶۵ درصد موارد) و در دیگر تحلیل‌ها که شکست توامان تیر و ستون در سازه مشاهده شده، در چندین مرحله اولیه (حدوداً ۳۰ مرحله اول)، شکست فقط در تیرها رخ داده است. این بدین معنی است که تیرها در خرابی پیشگام هستند و شکست، بیشتر در تیرها رخ داده تا ستونها (به دلیل ملاحظات طراحی تیرها ضعیفتر از ستونها در نظر گرفته می‌شوند). بنابراین حتی با در نظر گرفتن اندرکنش ستونها، باز روال توزیع شکست در تیرها به همین ترتیب است. خصوصاً در تحلیل‌هایی که اصلاً شکست ستون مشاهده نشده است. بعلاوه، توالی شکست در سقفها نیز، حتی اگر اندرکنش ستون لحاظ گردد تغییری نخواهد داشت و الگوهای خرابی ارائه شده در تیرها و سقفها، حتی با در نظر گرفتن اندرکنش ستون، باز پاسخگو خواهد بود. بنابراین الگوهای شکست ارائه شده در نتایج، جهت پیش بینی توالی شکست در تیرها و سقفها به قوت خود باقی و قابل استفاده است.

بررسی نتایج و مشاهدات نشان میدهد که به طورکل نقطه شروع خرابی تابعی از مکان مرکز جرم است. به گونه ای که با افزایش خروج از مرکزیت از ۰ تا ۲۵ درصد که متناظر با انتقال مرکز جرم به سمت چپ سازه یا همان لبه نرم است مکان نقطه شروع خرابی نیز به سمت چپ سازه متمایل می‌شود. بنابراین در سازه های نامتقارن احتمال رخداد شروع شکست در لبه نرم سازه بیشتر است. همچنین درخصوص توزیع شکست در طبقات و ارتفاع سازه، در بیشتر موارد توزیع خرابی در طبقات و متعاقباً در کل سازه به صورت افقی است و توزیع خرابی به صورت عمودی بندرت مشاهده شده است. به عبارت دیگر در ابتدا خرابی در تیرهای سازه مشاهده شده که در بیشتر موارد تیرهای سقف سوم می‌باشند و سپس توزیع خرابی به

طبق مراجع ارائه شده (دستورالعمل FEMA\_P695 و رساله و تحقیقات آقای Haselton و همکارانش در سالهای ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸)، منحنی رفتاری اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر به صورت مستقیم و لحظه به لحظه اثرات اندرکنش خمش و نیروی محوری را در نظر نمی‌گیرد. در این منحنی رفتاری، اثر یک M ثابت بر اساس روابط مربوط به منحنی رفتاری ایبارا-کراوینکلر به ازای یک نیروی محوری مشخص ناشی از بارگذاری موجود در نظر گرفته می‌شود. این روش مدلسازی در رساله Haselton و دستورالعمل FEMA\_P695 نیز به کار رفته است. در این مراجع مطالعات انجام شده در حالت دو بعدی هستند. در اینجا ما همان روال با همان فرضیات را در حالت سه بعدی دنبال کرده ایم به گونه ای که مراجع مذکور مبنای مقایسه و شاهد پژوهش ما باشند. علت استفاده از این روش مدلسازی این است که المانهای فایبر توانایی مدلسازی شکست را چه در سازه های بتنی و چه سازه های فولادی ندارند. دلیل استفاده از مفاصل پلاستیک به جای المانهای فایبر این است که مدل‌های با المانهای فایبری نمی‌توانند کرنش - نرم شدگی مرتبط با کمانش میلگردها را شبیه سازی کنند. بنابراین قادر به شبیه سازی شکست خمشی قابهای بتن مسلح نمی‌باشند. در مصالح فولادی نیز فایبرها نمی‌توانند رفتار میلگردها را در کمانش و شکست مدل کنند [۲۳].

بنابراین محققان بدین نتیجه رسیده اند که المانهای فایبر گرچه اثر اندرکنش خمش و نیروی محوری را در نظر می‌گیرند، اما برای مدل کردن شکست مناسب نیستند. با توجه به تحقیقات مفصل صورت گرفته در این خصوص، در حال حاضر تنها منحنی رفتاری که می‌تواند شکست را مدل کند مدل رفتاری اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر است. البته تحقیقات در خصوص کامل کردن مدل اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر و رفع محدودیتهای آن همچنان ادامه دارد. با استفاده از این منحنی رفتاری، مدلسازی رفتارکرنش-نرم شدگی مرتبط با خرد شدگی بتن،

دیگر نقاط سازه انتقال یافته است. خرابی ستونها معمولا در مراحل پایانی توزیع شکست اتفاق افتاده است. بررسی نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و شتاب نگاشتها و توزیع خرابی رخ داده در سازه ها حاکی از آن است که توزیع خرابی یا به عبارت دیگر مکانیسم خرابی پیش رونده مستقل از شتاب نگاشتهاست و به میزان خروج از مرکزیت در پلان سازه بستگی دارد. مهمترین نتیجه بدست آمده از این تحقیق این است که توزیع شکست در سازه های متقارن و نامتقارن مسیر خاص و ویژه ای است که به تغییر مکان مرکز جرم وابسته است.

### نتیجه گیری:

بر مبنای نتایج مشاهده شده الگوهای رفتاری توزیع شکست در سازه های متقارن و نامتقارن متفاوت است. در سازه های متقارن کوتاه مرتبه ابتدا شکست در قابهای بیرونی که به موازات مولفه قویتر زلزله هستند (در این تحقیق قابهای چپ و راست بیرونی) رخ داده و پس از گسترش خرابی در هسته مرکزی سقف از بیرون هسته به سمت داخل، در قابهای بیرونی که به موازات مولفه ضعیفتر زلزله هستند (در این تحقیق قابهای جلو و پشت سازه) به اتمام می رسد.

در سازه های نامتقارن با خروج از مرکزیت ۵ درصد، در بیشتر تحلیل‌های تاریخچه زمانی، رفتار سازه مشابه با رفتار سازه متقارن است گرچه در برخی تحلیلها ناحیه نرم خرابی بیشتری نسبت به سازه متقارن دارد. در هسته مرکزی طبقات نیز توزیع خرابی از بیرون هسته به سمت داخل می باشد.

در سازه های نامتقارن با خروج از مرکزیت ۱۵ درصد، شروع خرابی در ناحیه نرم است. سپس توزیع خرابی به دو صورت مشاهده می شود: در حالت اول پس از شکست ناحیه نرم، شکست در لبه سخت و سپس در قابهای

داخلی از چپ به راست (ناحیه نرم به سمت لبه سخت) توزیع می یابد.

در حالت دوم، ابتدا شکست در ناحیه نرم از قاب خارج به قاب داخل توزیع یافته و سپس در ناحیه سخت از قاب خارج به سمت قاب داخل به اتمام می رسد.

در سازه های نامتقارن با خروج از مرکزیت ۲۵ درصد، در بیشتر تحلیل های انجام شده توزیع خرابی مشابه با سازه های نامتقارن با خروج از مرکزیت جرمی ۱۵ درصد است با این تفاوت که خرابی بیشتر در سمت چپ سازه که نزدیک به مرکز جرم است متمرکز شده است.

فرایند توزیع خرابی در سازه های متقارن و نامتقارن با تغییر در میزان خروج از مرکزیت تغییر می کند. زیرا با تغییر توزیع جرمها، ماتریس جرم تغییر کرده و به تبع آن توزیع شکست نیز تغییر می یابد. همانطور که گفته شد در سازه های نامتقارن خرابی بیشتر درجایی رخ میدهد که تمرکز جرم بیشتری وجود دارد.

بر مبنای مشاهدات بعمل آمده توزیع شکست در سازه های متقارن و نامتقارن در طبقات سازه به صورت افقی است و توزیع شکست در ارتفاع سازه به صورت عمودی رخ نمی دهد. زیرا با توجه به ملاحظات معمول طراحی از آنجا که مقاطع تیرها ضعیف تر از مقاطع ستونها در نظر گرفته می شوند، ابتدا شکست در تیرها و در نهایت در ستونها رخ می دهد. همچنین ناکافی بودن سختی جانبی در ستونها سبب توزیع شکست به صورت افقی در طبقات می شود. بنابراین توزیع شکست در طبقات به صورت افقی مشاهده می شود.

توزیع خرابی در سازه های متقارن و نامتقارن بستگی به مکان مرکز جرم دارد و خرابی بیشتر در ناحیه ای رخ میدهد که تمرکز جرم بیشتری دارد. زیرا تمرکز جرم بیشتر سبب تمرکز نیروی اینرسی بیشتر جرمها شده و در نتیجه خرابی در ناحیه با تمرکز جرم بیشتر زودتر رخ خواهد داد.

وقتی شروع خرابی در تیرها باشد، توزیع شکست در سازه های متقارن و نامتقارن از سقف طبقه سوم شروع شده و

پس از توزیع در سقف سوم دو حالت برای توزیع خرابی در حالت اول، خرابی پس از سقف سوم، به بقیه نقاط سازه، از طبقه سوم به سمت پایین (به ترتیب طبقه دوم، اول و سپس پایه ستونها) منتقل می شود (به دلیل ملاحظات طراحی، زیرا مقاطع تیر و ستون در پایین سازه قویتر از مقاطع تیر و ستون در بالای سازه است و احتمال رخداد شکست در مقاطع ضعیف تر بیشتر می باشد).

در حالت دوم مشاهده می شود که توزیع خرابی بلافاصله پس از سقف سوم، به پایه ستونها منتقل شده و سپس از پایه ستونها به سمت بالای سازه (به ترتیب طبقه اول و دوم) توزیع خواهد شد. ولی هنگامیکه شروع خرابی در ستونها باشد توزیع خرابی به شکلهای متفاوت و غیر قابل پیش بینی مشاهده می شود. ملاحظات طراحی و مقدار متفاوت مقاومت افزون در مقاطع تیر و ستون می تواند در روند روال توزیع خرابی موثر باشد.

فرایند توزیع خرابی در سازه های ۳ طبقه متقارن و نامتقارن مستقل از شتاب نگاشتها مشاهده می شود. تحقیقات در این زمینه ادامه دارد.

در شکست سازه های متقارن و نامتقارن، احتمال شروع شکست در تیرها بیشتر از ستونها مشاهده می شود. اینکه در ملاحظات معمول طراحی، تیرها ضعیفتر از ستونها در نظر گرفته می شوند می تواند از دلایل آن باشد. همچنین از آنجایی که پیش از خروج از مرکزیت جرمی در سقف سازه ها تعبیه شده است، تیرها اولین و نزدیکترین

مشاهده می شود:

المانهایی هستند که تحت تاثیر این نامتقارنی قرار می گیرند و بنابراین احتمال رخداد خرابی در تیرها بیشتر از ستونهاست.

در سازه های نامتقارن، احتمال شروع خرابی در ستونها با افزایش خروج از مرکزیت افزایش می یابد. زیرا با افزایش خروج از مرکزیت تمرکز جرم در ناحیه نرم سازه بیشتر می شود و از آنجا که رخداد شکست در نواحی با تمرکز جرم بیشتر با احتمال بیشتری همراه است (به دلیل تمرکز نیروهای اینرسی بیشتر جرمها)، احتمال رخداد خرابی در ستونهای نواحی نرم سازه نیز بیشتر می شود.

در سازه های متقارن و نامتقارن مشاهده می شود که اگر توزیع شکست در قابهای میانی یک طبقه به اتمام رسد، احتمال رخداد نقطه شروع شکست در طبقات بعدی در قابهای میانی خواهد بود و به همین ترتیب اگر اتمام توزیع شکست در هر طبقه، در قابهای کناری باشد احتمال رخداد نقطه شروع خرابی در طبقات بعدی نیز در قابهای کناری خواهد بود.

احتمال رخداد نقاط شروع خرابی در سازه های نامتقارن بیشتر در لبه نرم سازه خواهد بود. زیرا تمرکز جرم در نواحی نرم سازه بیشتر است و جرم بیشتر تمرکز نیروهای اینرسی بیشتری به همراه خواهد داشت و در نتیجه احتمال رخداد شروع شکست در لبه نرم سازه های نامتقارن بیشتر خواهد بود.

## مراجع:

- [1]. Ellingwood, B., (2006). Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse, J. Perform. Constr. Facil. 20, SPECIAL ISSUE: Mitigating the Potential for Progressive Disproportionate Structural Collapse, 315-323. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE.
- [2]. Somes, N. F., (1973), Abnormal Loading on Buildings and Progressive Collapse, in Building Practices for Disaster Mitigation (Wright, Kramer and Culver, eds.), Building Science Series No. 46, National Bureau of Standards, Washington, DC.
- [3]. Burnett, E.F.P., (1975a), Abnormal Loading and Building Safety, SP-48, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1975.

- [4]Lu, X.Z., Lin, X., Ma, Y., Li, Y., and Ye, L. (2008). Numerical Simulation for the Progressive Collapse of Concrete Building due to Earthquake, Proc. the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China
- [5]Lu, X.Z., Li, Y., Ye, L.P., Ma, Y.F., and Liang, Y. (2008). Study on the Design Methods to Resist Progressive Collapse for Building Structures, Proc., Tenth Int. Symp. On Structural Engineering for Young Experts.
- [6]Alashker, Y., Li, H., and EL-Tawil, S. (2011). Approximations in Progressive Collapse Modeling, J. Struct. Eng., 137, 914-924.
- [7]Kim, J., and Hong, S. (2011). Progressive collapse performance of irregular buildings, Journal of the structural design of tall and special buildings, Volume 20, Issue 6, pages 721–734.
- [8]Ettouney Mohammed, Smilowitz Robert, Tang Margaret, Hapij Adam. (2012) . Global System Considerations for Progressive Collapse with Extensions to Other Natural and Man-Made Hazards. J. Perform. Constr. Facil. 20, SPECIAL ISSUE: Mitigating the Potential for Progressive Disproportionate Structural Collapse. 403–417.
- [9]. Helmy Huda, Salem Hamed, Mourad Sherif. (2012). Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method. Engineering Structures. 42: 127-141.
- [10]. Gurley C. (2012). Progressive Collapse and Earthquake Resistance. Pract. Period. Struct. Des. Constr. ASCE. 13(1): 19–23.
- [11]. Hayes Jr, John R, Woodson Stanley C, Pekelnicky Robert G, Poland Chris D, Corley W Gene, Sozen Mete. (2012). Can Strengthening for Earthquake Improve Blast and Progressive Collapse Resistance?. Structural Engineering, ASCE, 131(8):1157-1177.
- [12]. Sasani M, Sagioglu S. (2012). Progressive collapse resistance of hotel San Diego, J. Structural Engineering, 134(3): 478-488.
- [13]. Yi LI, Xin-zheng LU, Lie-ping YE. (2011). Study on the Progressive Collapse Mechanism of RC Frame Structures. Building Science, 27(5): 12-18.
- [14]. Tsai Meng-Hao, Lin Bing-Hui. (2008). Investigation of progressive collapse resistance and inelastic response for an earthquake-resistant RC building subjected to column failure. J of Engineering Structures, 30(12): 3619–3628.
- [15]. Sasani M, Kropelnicki J. (2008). Progressive collapse analysis of an RC structure, Struct. Design Tall Spec. Build., 17(4): 757–771.
- [16]. Pekau O-A, Cui Yuzhu. (2005). Progressive collapse simulation of precast panel shear walls during earthquakes. Computers & Structures, 84(5–6): 400–412.
- [17]. Talaat M, Mosalam K-M. (2009). Modeling progressive collapse in reinforced concrete buildings using direct element removal, Earthquake Engng. Struct. Dyn. 38: 609–634.
- [18]. Khandelwala Kapil, El-Tawila Sherif, Sadekb Fahim, (2009). Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames. Constructional Steel Research, 65(3): 699-708.
- [19]. Bazant Zdenek P, Verdure Mathieu. (2007). Mechanics of Progressive Collapse. Learning from World Trade Center and Building Demolitions. Engineering Mechanics. 3: 133.
- [20]. El-Tawil S, Khandelwal K, Kunnath S, Lew H-S. (2007). Macro models for progressive collapse analysis of steel moment frame buildings. Proc. Structures Congress 2007, Long Beach, CA.



- [21].Ibarra L-F, Medina R-A, Krawinkler H. (2005). Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration. *J. Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*,34: 1489–1511.
- [22].Lew H-S. (2003). *Best Practices Guidelines for Mitigation of Building Progressive Collapse*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, U.S.A 20899-8611, hsl@nist.gov.
- [23].FEMA P695. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Prepared by APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, www.ATCouncil.org.
- [24].Ibarra, L. F., Medina, R. A., and Krawinkler, H. (2005). Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration, *J. Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*,34, 1489–1511.
- [25].Haselton, C.B., and Deierlein, G.G. (2007). *Assessment Seismic Collapse Safety of Modern Reinforced Concrete Moment Frame Building*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.
- [26].Ibarra, L. F. and Krawinkler, H. (2004). Global Collapse of Deteriorating MDOF Systems, *Proc.13thWorld Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 116.
- [27].Ibarra, L. F. (2005). *Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations*, Ph.D. thesis, Stanford Univ.
- [28].Lignos, D. G. (2008). *Sideways Collapse of Deteriorating Structural Systems under Seismic Excitations*, Ph.D. thesis, Stanford Univ.
- [29].Lignos D. G., Zareian, F., and Krawinkler, H. (2008). Reliability of a 4-Story Steel Moment-Resisting Frame Against Collapse Due to Seismic Excitations, *J, ASCE*.
- [30].Krawinkler, H., Zareian, F., Lignos, D. G., and Ibarra, L. F., (2009). Prediction of Collapse of Structures under Earthquake Excitations, *COMPADYN 2009, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Greece.
- [31].Haselton, C.B., Liel, A. B., and Deierlein, G. G. (2009). Simulating Structural Collapse due to Earthquakes: Model Idealization, Model Calibration, and Numerical Solution Algorithms, *COMPADYN2009* , ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece.
- [32].Haselton, C.B., Liel, A. B., Lange, S. T., and Deierlein, G. G. (2008). *Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings*, PEER Report 2007/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley.
- [33].Zareian, F., Lignos D. G., and Krawinkler, H. (2009). Quantification of Modeling Uncertainties for Collapse Assessment of Structural Systems under Seismic Excitations, *COMPADYN 2009, ECCOMAS Thematic Conference on, Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Greece.
- [34].Zareian, F., and Medina, R. A. (2010). A Practical Method for Proper Modeling of Structural Damping in Inelastic Plane Structural Systems, *J. Computers and Structures* 88, Elsevier, 45–53.