

## بررسی اثر پس‌لرزه‌ها در ساختمان‌های فولادی با نامنظمی هندسی در پلان

پژمان کاکوان<sup>۱</sup>، طاها بخشپوری<sup>۲\*</sup>، سعید پورزینلی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، واحد رامسر، دانشگاه آزاد

۲- استادیار دانشکده فنی مهندسی شرق گیلان، گروه عمران، دانشگاه گیلان، رودسر

۳- دانشیار دانشکده فنی، گروه عمران، دانشگاه گیلان

\*tbakhshpoori@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت ۹۶/۱۱/۱۳

### چکیده

گسل‌ها معمولاً تمام انرژی‌های انباشته خود را زمانی که اولین گسیختگی رخ می‌دهد، آزاد نمی‌کنند. بلکه این انرژی‌ها در موقعیت‌های مختلف به صورت گسیختگی‌های متوالی تا تثبیت گسل ادامه می‌یابند. این گسیختگی‌های متوالی در طول گسل باعث ایجاد زلزله‌های متعددی می‌شوند که عمدتاً آن‌ها را به صورت پیش‌لرزه، لرزه اصلی و پس‌لرزه تقسیم بندی می‌کنند. مشاهدات میدانی نشان می‌دهند که سیستم‌های سازه‌ای تحت توالی زلزله‌ها، به ویژه سازه‌هایی که به دلیل زمان کم بین دو زلزله بهسازی نشده‌اند، دچار خرابی می‌شوند. در این مقاله به بررسی سازه‌های نامنظم هندسی در پلان با سیستم قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری ویژه تحت توالی زلزله پرداخته شده است. هر کدام از این سازه‌ها شامل یک مدل منظم و دو مدل نامنظم با نامنظمی کم و زیاد است، که مطابق آیین‌نامه‌های ایران طراحی اولیه شدند و سپس با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، این سازه‌ها تحت شتاب‌نگاشت‌های توالی زلزله واقعی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت پس از بررسی پارامترهایی چون جابه‌جایی بام، جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات و بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقات، افزایش پاسخ سازه‌ها و در نتیجه آن خرابی تحت اثر پس‌لرزه مشاهده شد. با افزایش میزان نامنظمی در پلان، ناپایداری سازه تحت پس‌لرزه افزایش پیدا می‌کند که ممکن است موجب خرابی سازه شود.

**واژگان کلیدی:** پس‌لرزه، نامنظمی هندسی در پلان، قاب خمشی فولادی ویژه، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

### ۱- مقدمه

ژاپن، مکزیک و ایران که به تازگی در تبریز، برازجان و اهر شاهد آن بوده‌ایم، رخ داده است. این پدیده عموماً در مناطقی رخ می‌دهد که مستعد لرزه‌خیزی زیاد است، حال آن که

پس‌لرزه پدیده‌ای است که از گذشته تا امروز در بسیاری از مناطق دنیا از جمله آمریکا، ایتالیا، یونان، ارمنستان، ترکیه،

آیین‌نامه‌های لرزه‌ای دنیا توجه کمی به آن نشان داده‌اند و اثر آن را در محاسبات در نظر نگرفته و هیچ‌گونه ضوابط مدونی برای آن ارائه نکرده‌اند که از آن جمله می‌توان به آیین‌نامه لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) اشاره نمود.

زلزله‌ها معمولاً به صورت گروهی یا رشته‌ای رخ می‌دهند. از آنجایی که فاصله زمانی بین دو یا چند رشته لرزه‌ای، کوتاه است، امکان ترمیم و بازسازی خرابی‌های حاصل از زلزله اصلی در سازه وجود ندارد که گاهی موجب می‌شود میزان خرابی به صورت تجمعی افزایش یابد. در واقع پس‌لرزه‌ها می‌توانند بسیار خطرناک باشند، زیرا قابل پیش‌بینی نبوده و می‌توانند باعث تخریب سازه‌هایی شوند که در طی لرزه‌ی اصلی آسیب دیده‌اند. به عنوان نمونه، بعد از لرزه‌ی اصلی در ۲۷ فوریه سال ۲۰۱۰ که مناطق مرکزی و جنوبی شیلی را لرزاند، ۳۰۶ پس‌لرزه با بزرگای بیش از ۵، در دو ماه مارس و آوریل ثبت شد. در میان آن‌ها ۲۱ پس‌لرزه دارای بزرگای بیش از ۶ ریشتر بوده که خرابی‌های گسترده به بار آوردند. همچنین باید متذکر شد که، عموماً لرزه‌هایی با بزرگای بزرگ‌تر از ۴ ریشتر را به عنوان پس‌لرزه‌های مخرب مورد توجه قرار می‌دهند. چرا که برای لرزه‌های کوچک‌تر از این مقدار، میزان خرابی به دست آمده قابل چشم‌پوشی است و حتی وقوع چنین لرزش‌هایی با شدت پایین‌تر، می‌تواند برای تخلیه انرژی مناطق لرزه‌خیز مفید باشد [1].

مشاهده آثار وقوع پس‌لرزه‌های مختلف از دیرباز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این پژوهش‌ها علاوه بر آن که برخی از نقاط ضعف سیستم‌های طراحی کنونی را نشان می‌دهد، بیانگر آن است که طراحی تنها بر پایه وقوع یک لرزه‌ی اصلی توسط آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای نمی‌تواند همواره مقاومت سازه را در برابر وقوع پس‌لرزه‌های پس از آن تامین کند. هر چند پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت گرفته است و همچنان صورت می‌گیرد، اما با این حال منجر به اعمال تغییرات لازم در آیین‌نامه‌ها و در نظر گرفتن آن‌ها در طراحی‌ها نشده است.

رویداد دو زمین‌لرزه به بزرگی ۶/۲ و ۶ ریشتر که در مرداد ماه سال ۱۳۹۱ شهرستان‌های اهر، ورزقان و هریس در آذربایجان

شرقی را در ایران لرزاند نیز مصداق توالی لرزه‌ای است. از جمله توالی لرزه‌ای رخ داده در مناطق شهری جهان می‌توان به توالی لرزه‌ای رخ داده در شهر وان ترکیه در سال ۲۰۱۱ میلادی اشاره کرد که شامل ۲ زلزله با شدت متوسط و بالا بود که در خلال یک هفته رخ دادند. در زلزله مذکور تلفات بسیاری پس از وقوع پس لرزه به علت عدم تخلیه ساختمان‌ها پس از زلزله اصلی به وقوع پیوست که به صورت ملموس و عینی نشان دهنده اهمیت بررسی توالی لرزه‌ای می‌باشد. یکی از موارد اخیر، توالی زلزله کوماموتو<sup>۱</sup> (ژاپن، ۲۰۱۶) است که در آن دو پیش‌لرزه با بزرگای ۶/۲ و ۶ و سپس لرزه اصلی با بزرگای ۷ بین ۱۴ و ۱۵ آوریل ۲۰۱۶ باعث خسارت شدید شدند [2].

با وجود افزایش علاقه در موضوع اثر تکرار زلزله (لرزه اصلی-پس لرزه متوالی)، مطالعات بسیاری در رابطه با عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها تحت تکرار زلزله انجام نشده است. هاتزیوزیلو و هاتزیجورجیو برای اولین بار پاسخ غیرخطی سازه‌های سه‌بعدی بتن‌آرمه را تحت تکرار زلزله بررسی کردند. آن‌ها با بررسی‌هایی که انجام دادند بیان کردند که میزان شکل‌پذیری در طول تکرار زلزله در قیاس با یک زلزله افزایش می‌یابد. زمانی که سازه‌ها تحت تکرار زلزله قرار دارند تغییر مکان ماندگار زیاد را از خود نشان می‌دهند [3]. عبدالنبی در مطالعه‌ای، به ارزیابی روابط شکنندگی لرزه‌ای برای سیستم‌های قاب بتن مسلح تحت تکرار لرزه اصلی و پس‌لرزه پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که توالی زلزله تاثیر قابل توجهی بر روابط آسیب‌پذیری قاب‌های بتنی دارد [4]. ژانگ و همکاران ضریب کاهش مقاومت سیستم یک درجه آزاد را تحت توالی زمین‌لرزه‌ها (لرزه اصلی و پس‌لرزه) مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بر اساس تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سیستم‌های SDOF، اثرات دوه تناوب طبیعی، ضریب شکل‌پذیری، شاخص خسارت و پس‌لرزه را به طور آماری بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که پس‌لرزه تاثیر قابل توجهی بر ضریب کاهش مقاومت دارد [5]. حسین‌پور و عبدالنبی رفتار کاهش مقاومت سازه‌های بتن آرمه تحت اثر توالی لرزه‌ای را با استفاده از مدل اجزا محدود شبیه سازی

<sup>1</sup> Kumamoto

سختی، نامنظمی در مقاومت، نامنظمی در جرم، ناپیوستگی در سیستم المان‌های مقاوم جانبی و نامنظمی هندسی است [6]. در این مطالعه به بررسی سازه‌های با نامنظمی هندسی در پلان می‌پردازیم. مطابق آیین‌نامه لرزه‌ای ایران [6] برای ایجاد نامنظمی هندسی در پلان سازه، باید تورفتگی به نسبت بیش از ۰/۲ کل طول ساختمان ایجاد شود (شکل ۱). مطابق شکل (۲) دو مدل نامنظمی در این مطالعه در نظر گرفته شده است. نامنظمی اول دارای تورفتگی به اندازه ۵ متر (یک دهانه) و نامنظمی دوم دارای تورفتگی به اندازه ۱۰ متر (دو دهانه) است، که به ترتیب ۲۵٪ و ۵۰٪ از طول ساختمان هستند. برای طراحی سازه‌های با نامنظمی زیاد و شدید پیچشی در پلان مطابق آیین‌نامه لرزه‌ای [6] مجاز به استفاده از تحلیل‌های خطی نیستیم. با فرض نامنظمی زیاد و شدید پیچشی برای سازه‌ها، در این مطالعه از روش تحلیل دینامیکی طیفی استفاده خواهد شد.

شکل ۱. نامنظمی هندسی در پلان مطابق آیین‌نامه لرزه‌ای ایران

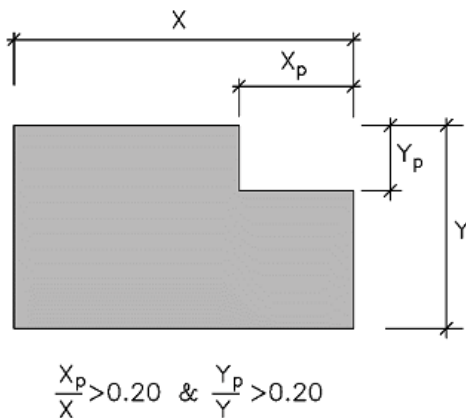


Fig. 1. Geometric irregularities in the plan according to Iran's seismic guideline

شکل ۲. پلان سازه‌های نامنظم.

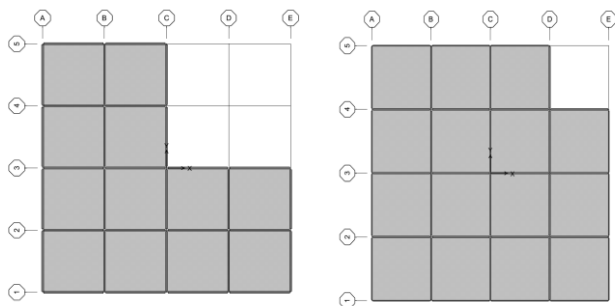


Fig. 2. Plan of irregular structures.

کردند. نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان داد که جهت اعمال زلزله، نامنظمی سازه و مولفه عمودی زلزله می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر پاسخ سازه تحت توالی زلزله داشته باشند. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد قطبیت پس‌لرزه می‌تواند به طور قابل توجهی پاسخ سازه نامنظم را تغییر دهد [2]. در این مطالعه به بررسی تاثیر پس‌لرزه‌های زلزله در سازه‌های فولادی با نامنظمی هندسی در پلان که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، پرداخته شده است. برای این منظور سازه‌های ۸، ۱۲ و ۲۰ طبقه فولادی با سیستم قاب خمشی تحت توالی لرزه‌ای با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای جابه‌جایی بام، جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات و جابه‌جایی نسبی طبقات مورد مقایسه قرار گرفته است که حاکی از افزایش پاسخ سازه‌ها و در نتیجه آن خرابی تحت اثر پس‌لرزه است. با افزایش میزان نامنظمی در پلان، ناپایداری سازه تحت پس‌لرزه افزایش پیدا می‌کند که ممکن است موجب خرابی سازه شود.

## ۲- نامنظمی هندسی در پلان

ساختمان‌ها با توجه به نوع کاربری و یا موقعیت ساخت ممکن است دارای پیکربندی متفاوتی در هندسه مانند تغییر ناگهانی در پلان و تقارن سازه باشند که این عوامل نقش مهمی در عملکرد سازه دارند. هر چند که یک سازه نامنظم مطابق با ضوابط آیین‌نامه طراحی شده باشد، اما تحت حوادث طبیعی و یا ساخت دست بشر ممکن است عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سازه‌های منظم از خود نشان دهد. پس نیاز است که رفتار این نوع سازه‌ها بررسی شود.

نامنظمی به دو قسمت تقسیم می‌شود. نامنظمی در پلان و نامنظمی در ارتفاع. نامنظمی در پلان می‌تواند تحت تاثیر عواملی مانند تغییرات ابعاد هندسی پلان، پیچش، دیاگرام، سیستم‌های غیر موازی و خارج از صفحه ایجاد شود. نامنظمی در ارتفاع در سازه‌های ساختمانی می‌تواند با توزیع نامنظم دست کم یکی از کمیت‌هایی از قبیل جرم، سختی و مقاومت رخ دهد. این نامنظمی به طور معمول شامل نامنظمی در

جدول ۱. بارگذاری در نظر گرفته شده برای مدل‌ها ( $kgf/m^2$ ).

بار مرده	بار زنده	بار پاریشن
۴۲۰	۲۰۰	۱۸۰
بام	۱۵۰	-

Table 1. Loading intended for the models ( $kgf/m^2$ ).

### ۴- مدل‌سازی غیرخطی

در Perform-3D [10] برای مدل‌سازی تیرها، ستون‌ها و بادبندها از المان Frame استفاده می‌شود. هر المان متشکل از چندین مولفه است. مولفه‌های تشکیل دهنده المان‌های ستون و تیر به ترتیب در شکل‌های (۴ و ۵) ارائه شده‌اند. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، مولفه‌های FEMA در کار حاضر بخش کلیدی در مدل‌سازی المان ستون را تشکیل می‌دهند. آن‌ها مولفه‌هایی با طول محدود و خواص غیرخطی هستند. مدل دارای دو مولفه از این نوع است. شکل (۴) مدل chord rotation را نشان می‌دهد، که دارای محدودیت‌هایی است که تنها برای تیرها و ستون‌های متقارن با مقاومت یکسان و نقطه عطف در وسط دهانه بکار می‌روند. اما PERFORM به کاربران اجازه می‌دهد تا مقاومت‌های مختلف در دو مولفه داشته باشند و نیز برای حالتی که نقطه عطف در وسط نیست طول‌های مختلف برای دو مولفه در نظر بگیرند. شکل (۵) المان تیر استفاده شده را نشان می‌دهد که از مدل مفصل‌های غیرخطی متمرکز به فاصله  $0.5d$  از هر ستون به همراه قسمت‌های الاستیک استفاده شده است. این مفصل‌ها بصورت مفصل‌های خمیری مدل می‌شوند.

شکل ۴. المان ستون برای مدل‌سازی غیرخطی.

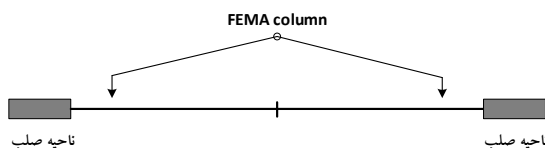


Fig. 4. Column element for nonlinear modeling.

شکل ۵. المان تیر برای مدل‌سازی غیرخطی.

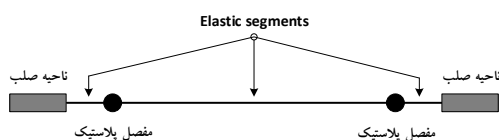


Fig. 5. Beam element for nonlinear modeling.

### ۳- مدل‌های سازه‌ای

ساختمان‌های مورد نظر در این مطالعه، سه ساختمان ۸، ۱۲ و ۲۰ طبقه به صورت سه‌بعدی شکل (۳)، با ارتفاع تیپ طبقات یکسان و برابر  $3/5$  متر و پلان متقارن با ۴ دهانه ۵ متری است. سیستم در نظر گرفته شده برای طراحی این دسته از سازه‌های فولادی، سیستم قاب خمشی فولادی ویژه است.

شکل ۳. نمای سه‌بعدی مدل‌های منظم

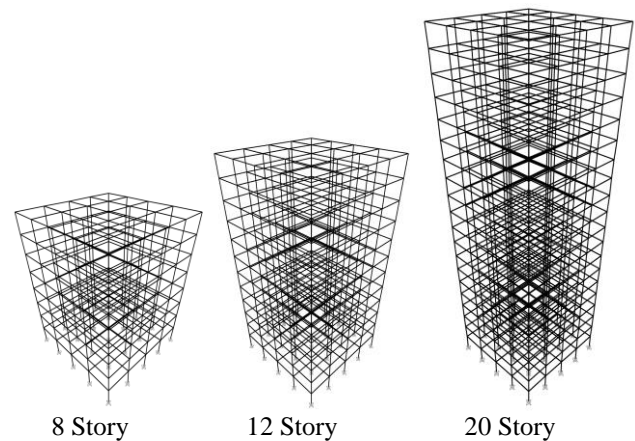


Fig. 3. 3D view of regular structure

طراحی سازه‌ها با نرم‌افزار SAP 2000 [7] و بر اساس آیین‌نامه فولاد ایران (مبحث دهم) [8] است. برای طراحی سازه‌ها طبق آیین‌نامه لرزه‌ای ایران [6] از روش تحلیل دینامیکی طیفی استفاده شده است. کاربری ساختمان‌ها از نوع مسکونی با اهمیت متوسط فرض شده است. منطقه مورد مطالعه با شدت لرزه‌خیزی خیلی زیاد و خاک از نوع III در نظر گرفته شده است. تمامی اتصالات صلب و تکیه‌گاه‌ها گیردار فرض شده‌اند. بارگذاری ثقلی بر اساس آیین‌نامه بارگذاری ایران (مبحث ششم) [9] انجام شده و در جدول (۱) ارائه شده است. برای محاسبه وزن هر طبقه در هنگام زلزله کل بار مرده و ۲۰ درصد از بار زنده لحاظ شده است. سازه به صورت سه بعدی مدل‌سازی و تحلیل شده است. برای طراحی سازه از مقاطع IPE برای تیرها و مقاطع TUBO برای ستون‌ها از مقاطع اروپایی (EURO) در نرم‌افزار وارد شده است و دارای فشردگی لرزه‌ای است. توضیحات مدل‌سازی غیرخطی سازه برای بررسی دقیق‌تر رفتار سازه تحت توالی زلزله در ادامه ارائه شده است.

## ۵- تحلیل تاریخیچه زمانی

شوند که بزرگی، فاصله گسل‌ها و سازوکار منبع زمین‌لرزه آن‌ها متناسب با زمین‌لرزه طرح و محل ساخت سازه باشد. این معیارها برای رفع نگرانی‌های فوق کافی نیستند از اینرو برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب، با توجه به مطالعات هاتزیوزیلو و هاتزیجورجیو [3] که مشخصات زلزله آن‌ها با مشخصات ساختگاه مورد فرض در این مطالعه یکی می‌باشد استفاده شده است. با توجه به اینکه تعداد طبقات سازه ۸، ۱۲ و ۲۰ طبقه است، مقدار ضریب مقیاس زلزله‌ها به ترتیب ۰/۶، ۰/۸۱ و ۱/۰۱ به دست آمده است. باید توجه داشت که پس‌لرزه‌ها با فاصله زمانی مختلف نسبت به زلزله اصلی رخ می‌دهند که در نظرگرفتن این فاصله موجب افزایش زمان تحلیل می‌شود. بدین منظور بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته انتخاب فاصله زمانی ۲۰ ثانیه با شتاب صفر بین دو تحریک به منظور ساکن شدن قاب تحت اثر تحریک زلزله اصلی مناسب به نظر می‌آید. شکل (۶) نمونه شتاب‌نگاشت توالی زلزله وارد به سازه را نشان می‌دهد.

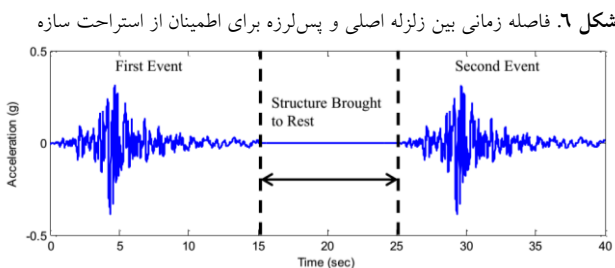


Fig. 6. The time interval between the mainshock and aftershock to ensure resting of the structure [11]

در این مطالعه به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های طراحی شده تحت اثر زلزله‌های متوالی، شش دسته زلزله متوالی که فاصله زلزله اصلی با پس‌لرزه متناظر با آن در فاصله زمانی کمتر از یک هفته در منطقه مورد نظر رخ داده، از پایگاه اطلاعات زمین‌لرزه‌های قوی (PEER) انتخاب شده است (جدول ۲). به دلیل احتمال وقوع پس‌لرزه‌های متوسط تا شدید در یک منطقه با فاصله زمانی کوتاه از زلزله اصلی و همچنین عدم بهسازی سازه خسارت دیده از زلزله اصلی، تاثیر این پس‌لرزه‌ها بر سازه خسارت دیده مورد توجه قرار می‌گیرد. از طرفی به دلیل احتمال وقوع بیش از یک پس‌لرزه در منطقه نیاز به بررسی پاسخ سازه تحت اثر زلزله‌ای متوالی با در نظر گرفتن اثر چند پس‌لرزه مورد توجه قرار می‌گیرد ولی از آنجا که برای تحلیل قاب‌ها تحت اثر زلزله متوالی با بیش از یک پس‌لرزه، زمان تحلیل افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت، در این پژوهش تنها از بزرگترین پس‌لرزه در تحلیل دینامیکی استفاده شده است. دقت تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی تحت تاثیر عوامل متعددی من جمله چگونگی انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها برای تحلیل است. آیین نامه‌های زلزله به عنوان نمونه استاندارد ۲۸۰۰ [7] معیارهای کلی برای انتخاب زلزله‌های مناسب را ارائه می‌دهند. شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا باشند. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخیچه زمانی باید به نحوی انتخاب

جدول ۲. مشخصات رکوردهای توالی زلزله اعمال شده به سازه.

no	Seismic sequence	Station	Date (time)	Magnitude ( $M_w$ )	RSN <sup>2</sup>	PGA <sup>1</sup> (g)
1	Mammoth Lakes	Convict Creek	1980/05/25 (16:34)	6.06	230	0.442
			1980/05/25 (20:35)	5.7	240	0.484
2	Imperial Valley	Holtville Post Office	1979/10/15 (23:16)	6.53	185	0.258
			1979/10/15 (23:19)	5.01	208	0.114
3	Coalinga	Coalinga-14th & Elm	1983/07/22 (02:39)	5.77	406	0.519
			1983/07/25 (22:31)	5.21	418	0.677
4	Chalfant Valley	Zack Brothers Ranch	1986/07/20 (14:29)	6.13	547	0.271
			1986/07/21 (14:42)	5.77	558	0.447
5	Whittier Narrows	San Marino	1987/10/01 (14:42)	5.99	691	0.193
			1987/10/04 (10:59)	5.27	716	0.206
6	Northwest China	Jiashi	1997/04/05 (23:46)	6.1	1748	0.273
			1997/04/11 (05:34)	5.9	1752	0.300

Table 2. Seismic sequence records applied to the structure.

<sup>1</sup> Peak Ground Acceleration

<sup>2</sup> Record Serial Number

جدول ۳. دوره تناوب (برحسب ثانیه) شکل‌های مودی سازه‌های مدلسازی شده.

Structure	regular			Irregular 1			Irregular 2			
	No mode	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
8 Story		2.26	2.26	2.13	1.96	1.96	1.83	1.98	1.97	1.86
12 Story		3.00	3.00	2.78	2.59	2.59	2.38	2.64	2.64	2.41
20 Story		3.67	3.67	3.37	3.74	3.72	3.32	3.33	3.32	2.94

Table 3. Time period (in seconds) Modal shape of modeling structures.

### ۶- مطالعات عددی

تحلیل مودال، بخشی از تلاش‌ها برای شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه همراه با مدل سه‌بعدی است. برای این منظور دوره تناوب‌ها و شکل‌های مودی در طول ارتعاش آزاد برای سازه‌ها در نرم‌افزار بدست آورده شد و به منظور مقایسه رفتار دینامیکی آن‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که می‌دانیم یک سازه چند طبقه دارای چند درجه آزادی و شکل‌های مودی ارتعاش سازه است که شکل‌های مودی به طور معمول با ویژگی‌های دینامیکی سازه مشخص می‌شود. شکل‌های مودی در نظر گرفته شده در این مطالعه ابتدا قبل از

انجام تحلیل تاریخیچه زمانی لرزه‌ای به دست آمده است.

جابه‌جایی بام همواره به عنوان یکی از اصلی‌ترین شاخص‌های سنجش عملکرد ساختمان در برابر بارگذاری لرزه‌ای به ویژه در حالت ورود به ناحیه غیرخطی سازه‌هاست تا جایی که برخی از تحلیل‌های سازه‌ای با اتکا به آن به بررسی پایداری سازه‌ها می‌پردازند. در شکل‌های (۷ - ۹) جابه‌جایی طبقه بام برای شش توالی زلزله مختلف وارد بر سازه‌های منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ طی روش تحلیل تاریخیچه زمانی آورده شده است. در این شکل‌ها محور قائم و افقی به ترتیب جابه‌جایی بر حسب سانتی‌متر و زمان بر حسب ثانیه را نشان می‌دهند. شکل (۷) به ترتیب جابه‌جایی بام سازه ۸ طبقه منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ تحت توالی زلزله‌های ماموت لیک، امپریال‌والی، کولینگا، کالفانت‌والی، وایترناروز و نورثوست را نشان می‌دهد. نمودارها نشان می‌دهند که اگر سازه تحت زلزله اصلی وارد ناحیه غیرخطی شود، به سبب آن سازه شامل خسارت اولیه می‌شود و این دلیل بر تاثیر گذاری بیشتر پس‌لرزه است. بنابراین موجب افزایش جابه‌جایی بام تحت پس‌لرزه می‌شود و ممکن است سبب خرابی در سازه شود.

شکل ۷. جابه‌جایی بام سازه‌های ۸ طبقه منظم و نامنظم تحت اثر توالی زلزله.

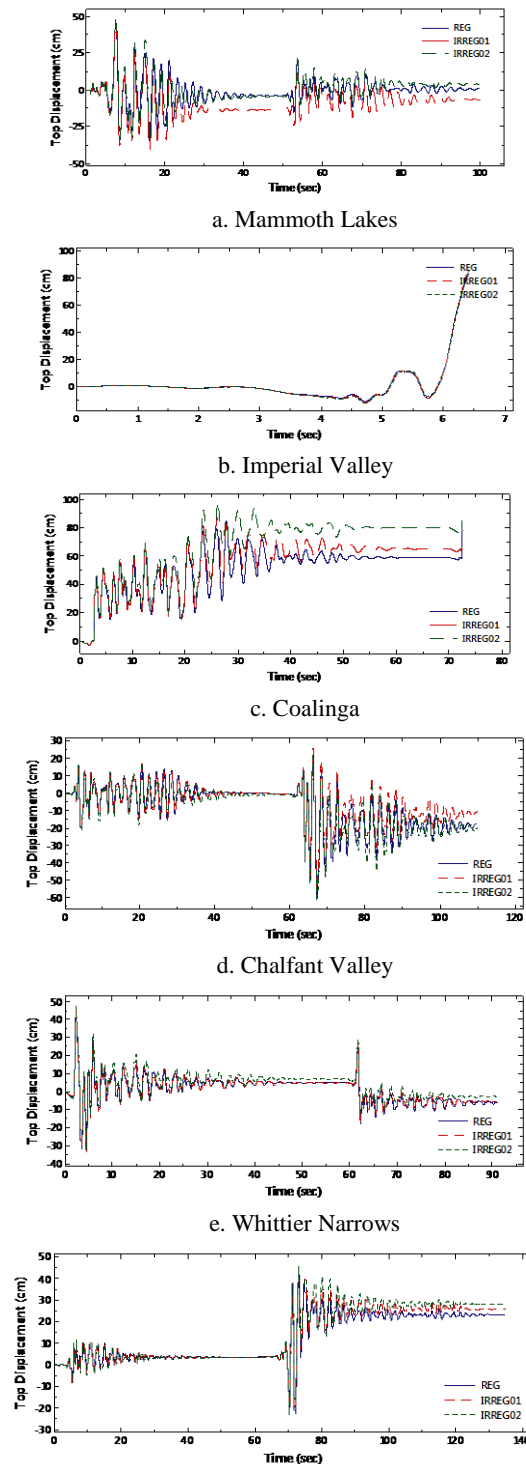
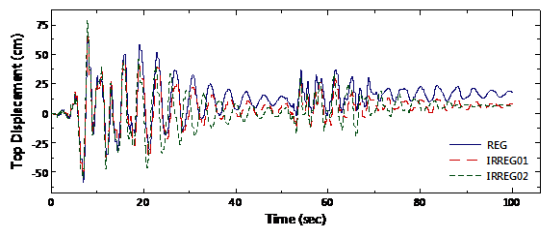
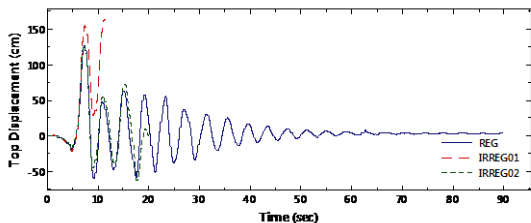


Fig. 7. Roof displacement of regular and irregular 8 story structures under seismic sequence.

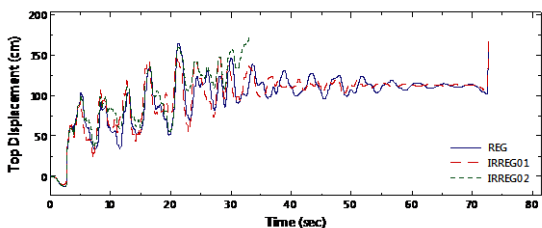
شکل ۹. جابه‌جایی بام سازه‌های ۲۰ طبقه منظم و نامنظم تحت اثر توالی زلزله.



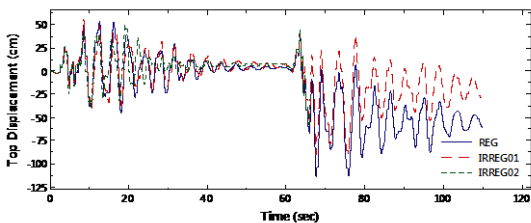
a. Mammoth Lakes



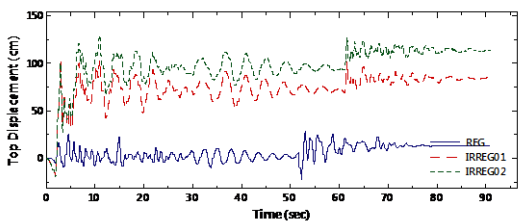
b. Imperial Valley



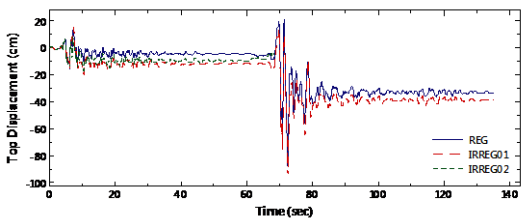
c. Coalinga



d. Chalfant Valley



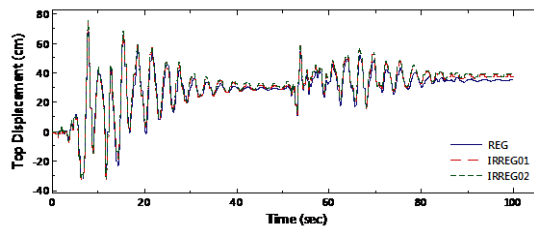
e. Whittier Narrows



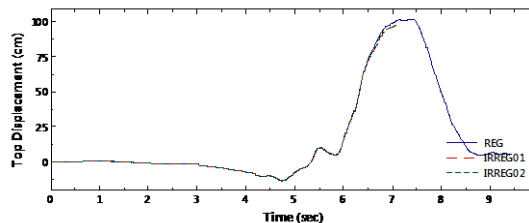
f. Northwest China

Fig. 9. Roof displacement of regular and irregular 20 story structures under Seismic sequence.

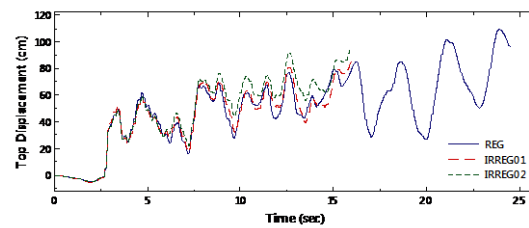
شکل ۸. جابه‌جایی بام سازه‌های ۱۲ طبقه منظم و نامنظم تحت اثر توالی زلزله.



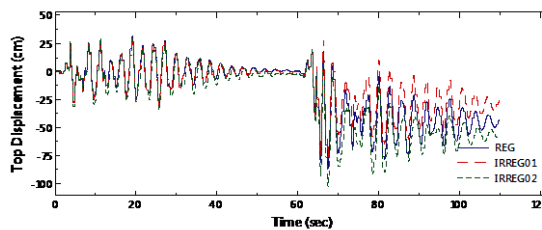
a. Mammoth Lakes



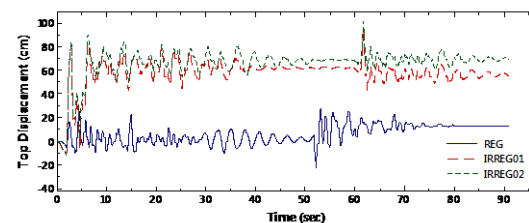
b. Imperial Valley



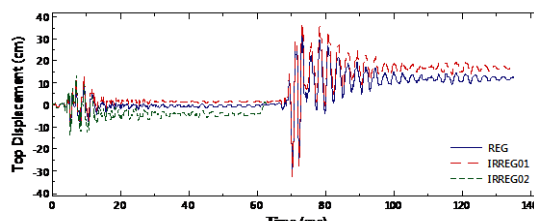
c. Coalinga



d. Chalfant Valley



e. Whittier Narrows



f. Northwest China

Fig. 8. Roof displacement of regular and irregular 12 story structures under Seismic sequence.

افزایش می‌یابد. از طرفی جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات می‌تواند به عنوان معیار مناسبی برای بیان میزان خسارت وارد شده بر سازه تحت اثر زلزله اصلی تعیین شود. شکل‌های (۱۰) - (۱۲) نشان دهنده جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات سازه تحت زلزله اصلی (MS) و توالی زلزله (AS) هستند. با بررسی شکل (۱۰) مشاهده می‌شود پس‌لرزه باعث خرابی سازه ۸ طبقه تحت توالی زلزله‌های امپریال‌والی و کولینگا می‌شود. قابل توجه این‌که معیار خرابی جابه‌جایی بام است. مقدار بیشترین جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقه سازه‌های منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ تحت توالی زلزله ماموث لیک به ترتیب ۰/۰۲۱، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۱۹، تحت توالی زلزله کالفانت‌والی ۰/۰۲، ۰/۰۱۸ و ۰/۰۲۲، تحت زلزله وایترناروز ۰/۰۰۹، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و تحت زلزله نورثوست ۰/۰۱۷، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۱۹ است. سازه نامنظم ۱ مقادیر مشابه سازه منظم را نتیجه می‌دهد ولی از تاثیر فرکانس زلزله بر سازه نمی‌توان چشم‌پوشی کرد مانند زلزله ماموث لیک که سازه نامنظم ۱ کمترین جابه‌جایی ماندگار طبقه را دارد. سازه نامنظم ۲ به دلیل شدیدتر بودن نامنظمی در این سازه رفتاری ناپایدارتر تحت توالی زلزله از خود نشان داد و جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات بیشتری از خود بر جای گذاشت.

با بررسی شکل (۱۱) مشاهده می‌شود مانند سازه ۸ طبقه، در سازه ۱۲ طبقه نیز پس‌لرزه‌های امپریال‌والی و کولینگا موجب خرابی شده‌اند.

سازه ۱۲ طبقه همچنین در حالت نامنظم ۲ تحت پس‌لرزه نورثوست دچار خرابی شده است. که می‌تواند ناشی از محتوای فرکانس پس‌لرزه و همچنین آسیب دیدن شدید سازه تحت لرزه اصلی باشد. با بررسی شکل (۱۲) مشاهده می‌شود همانند سازه ۱۲ طبقه، در سازه ۲۰ طبقه نیز پس‌لرزه‌های امپریال‌والی و کولینگا موجب خرابی شده‌اند و همچنین سازه نامنظم ۲ تحت پس‌لرزه نورثوست دچار خرابی شده است. که می‌توان ناشی از محتوای فرکانس پس‌لرزه و همچنین آسیب دیدن شدید سازه تحت لرزه اصلی بیان کرد.

جابه‌جایی نهایی بام سازه‌های منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ تحت زلزله ماموث لیک به ترتیب ۰/۸، ۶/۶ و ۳/۳۶ سانتی‌متر، تحت زلزله کولینگا به ترتیب ۷۸، ۷۹ و ۸۰ سانتی‌متر، تحت زلزله کالفانت‌والی به ترتیب ۱۸، ۱۰، ۱۹ سانتی‌متر و تحت زلزله نورثوست به ترتیب ۲۲، ۲۵ و ۲۸ سانتی‌متر است که مشاهده می‌شود نامنظمی موجب افزایش جابه‌جایی نهایی بام می‌شود. البته در زلزله وایترناروز پس‌لرزه باعث تغییر در مقدار جابه‌جایی نهایی بام شده است و عکس نتیجه بالا مشاهده می‌شود، و زلزله امپریال‌والی موجب خرابی سازه شده است.

شکل (۸) به ترتیب جابه‌جایی بام سازه ۱۲ طبقه منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ تحت توالی زلزله‌های ماموث لیک، امپریال‌والی، کولینگا، کالفانت‌والی، وایترناروز و نورثوست نشان می‌دهند. نتایج مانند سازه ۸ طبقه بر تاثیر نامنظمی بر افزایش جابه‌جایی بام دلالت دارد. به عنوان نمونه رفتار سازه‌های نامنظم تحت توالی زلزله وایترناروز نشان می‌دهد که سازه‌ها در ابتدای زلزله دچار شکست شدند و باعث به وجود آمدن جابه‌جایی ماندگار در سازه شدند.

شکل (۹) به ترتیب جابه‌جایی بام سازه ۲۰ طبقه منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ تحت توالی زلزله‌های ماموث لیک، امپریال‌والی، کولینگا، کالفانت‌والی، وایترناروز و نورثوست را نشان می‌دهند. بیشترین جابه‌جایی بام سازه‌های منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ تحت زلزله ماموث لیک به ترتیب ۶۲، ۶۴ و ۷۹ سانتی‌متر، تحت زلزله کولینگا به ترتیب ۱۶۴، ۱۶۸ و ۱۷۴ سانتی‌متر، تحت زلزله کالفانت‌والی به ترتیب ۱۱۳، ۸۹ و ۵۷ سانتی‌متر، تحت زلزله وایترناروز به ترتیب ۲۷، ۱۰۹ و ۱۲۹ و تحت زلزله نورثوست به ترتیب ۸۷، ۹۳ سانتی‌متر است.

همچنین سازه نامنظم ۲ تحت پس‌لرزه نورثوست دچار خرابی می‌شود. همانطور که از نتایج استنباط می‌شود. نامنظمی باعث افزایش ناپایداری سازه تحت بار لرزه‌ای می‌شود و پس‌لرزه می‌تواند این ناپایداری را تشدید کند.

زمانی که یکسری زلزله متوالی در منطقه‌ای اتفاق می‌افتد میزان جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات در اغلب سازه‌های آن منطقه



شکل ۱۰. جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات سازه‌های ۸ طبقه منظم و نامنظم تحت توالی زلزله.

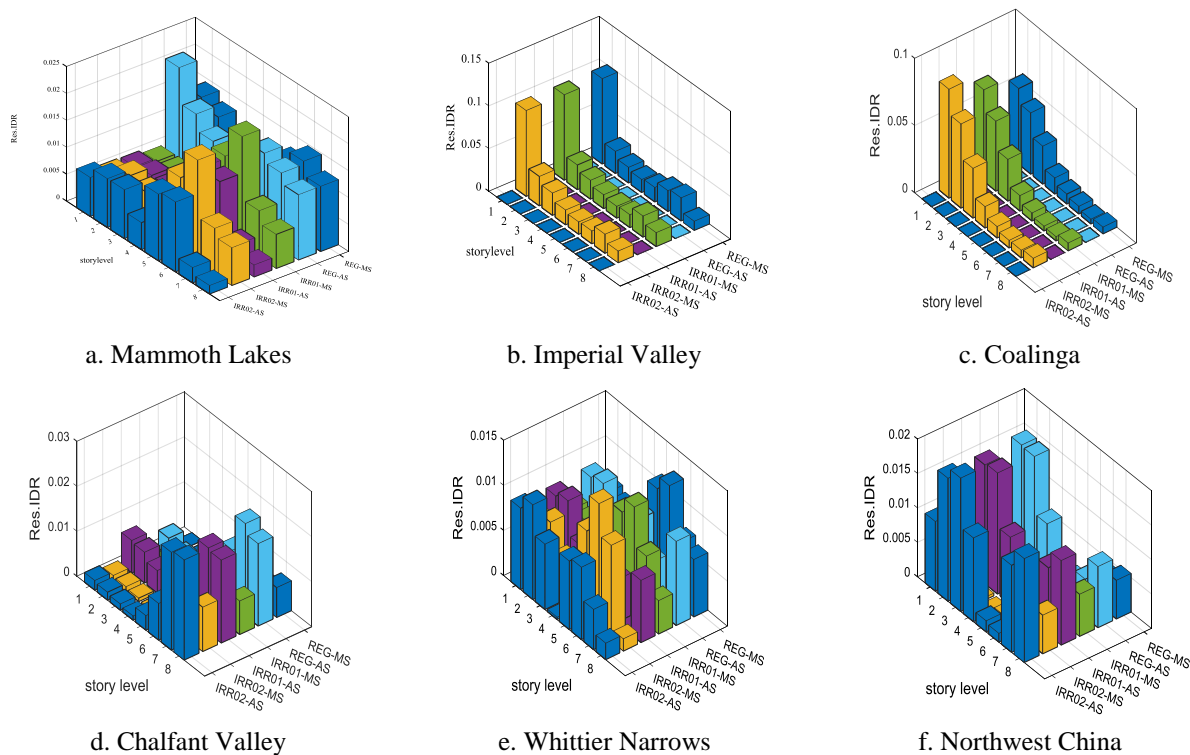


Fig. 10. Residual inter story drift of regular and irregular 8 story structures under Seismic sequence.

شکل ۱۱. جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات سازه‌های ۱۲ طبقه منظم و نامنظم تحت توالی زلزله.

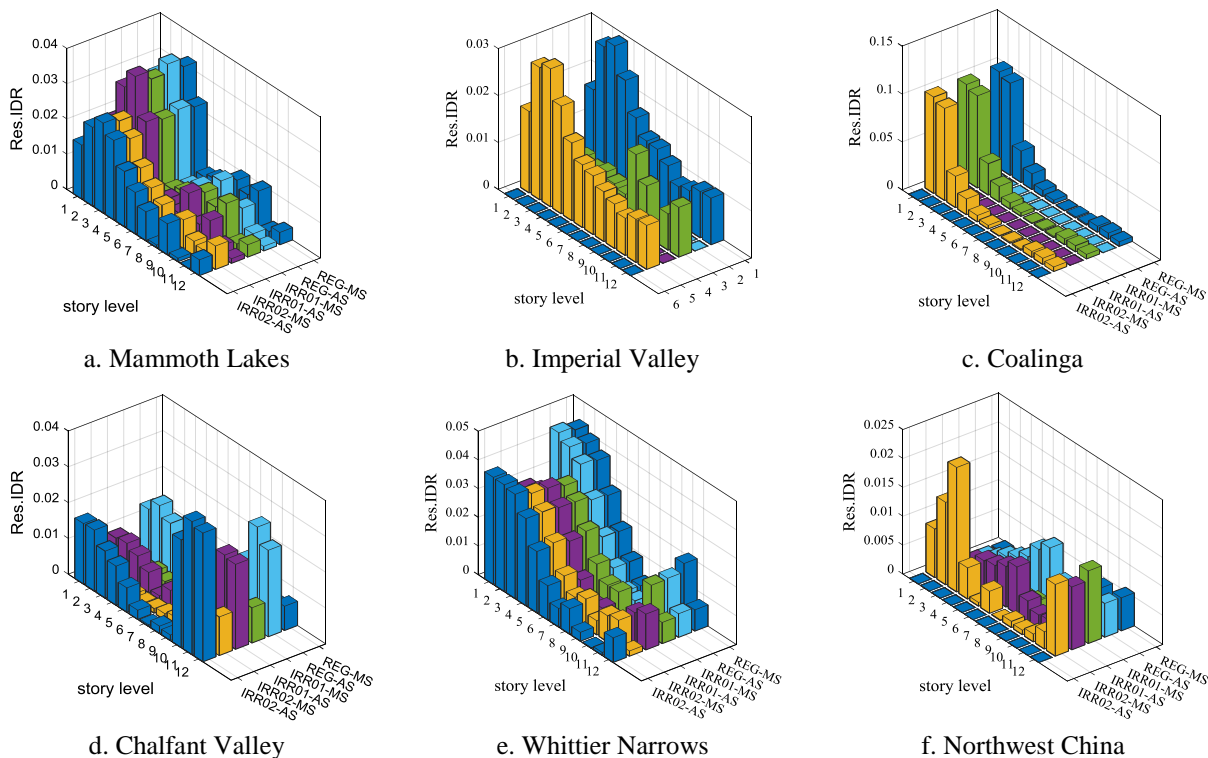


Fig. 11. Residual inter story drift of regular and irregular 12 story structures under Seismic sequence.

شکل ۱۲. جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات سازه‌های ۲۰ طبقه منظم و نامنظم تحت توالی زلزله.

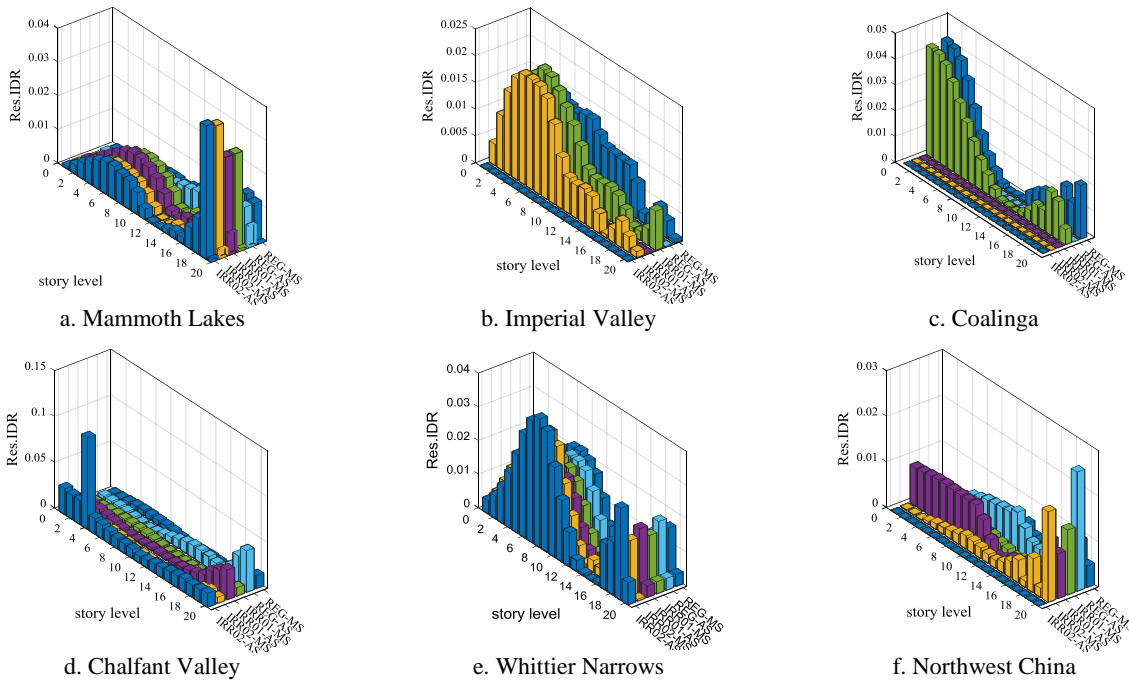


Fig. 12. Residual inter story drift of regular and irregular 12 story structures under Seismic sequence.

شکل ۱۳. حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ۸ طبقه منظم و نامنظم طبقه تحت توالی زلزله.

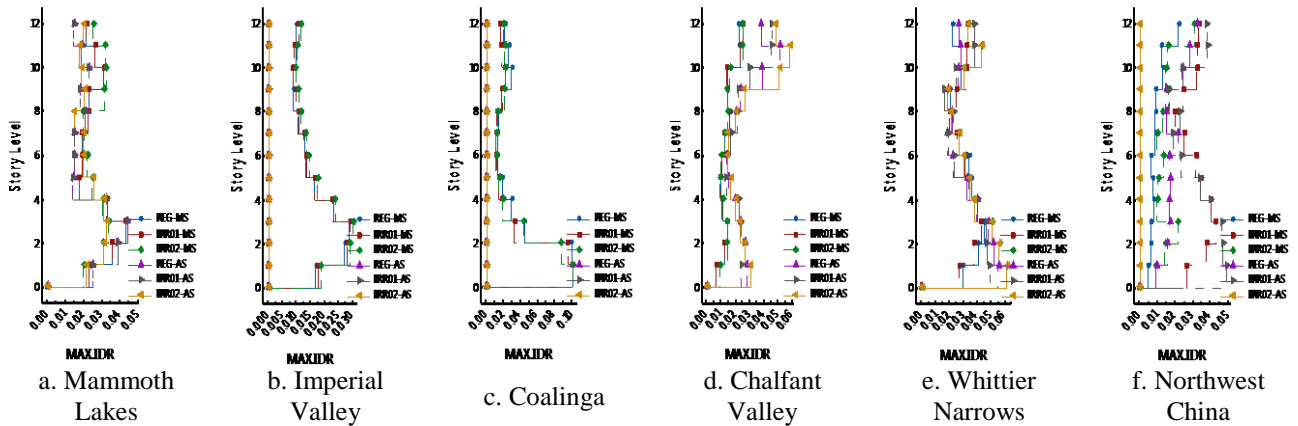


Fig. 13. Maximum inter story drift of regular and irregular 8 story structures under Seismic sequence.

شکل ۱۴. بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ۱۲ طبقه منظم و نامنظم طبقه تحت توالی زلزله.

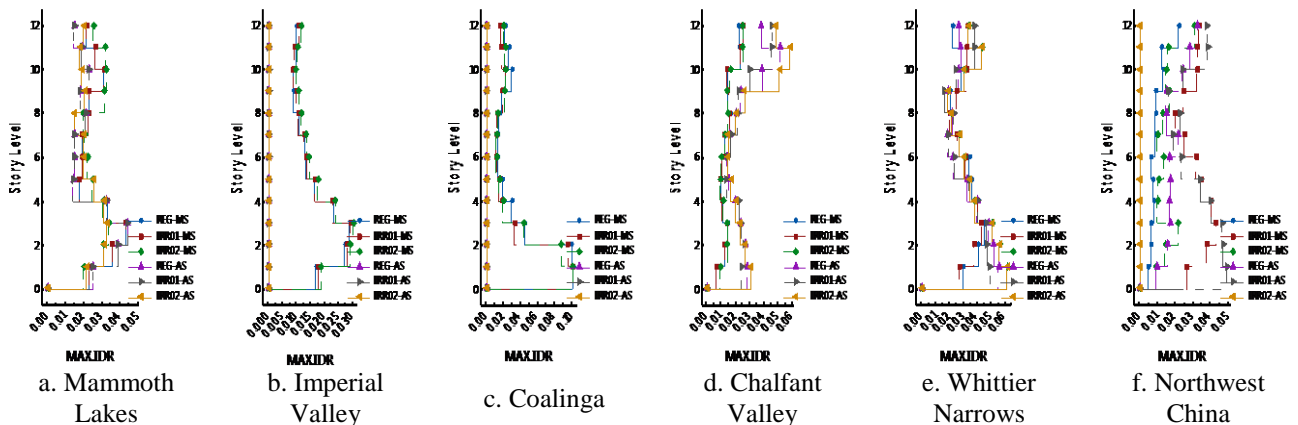


Fig. 14. Maximum inter story drift of regular and irregular 12 story structures under Seismic sequence.

شکل ۱۵. بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ۲۰ منظم و نامنظم طبقه تحت توالی زلزله.

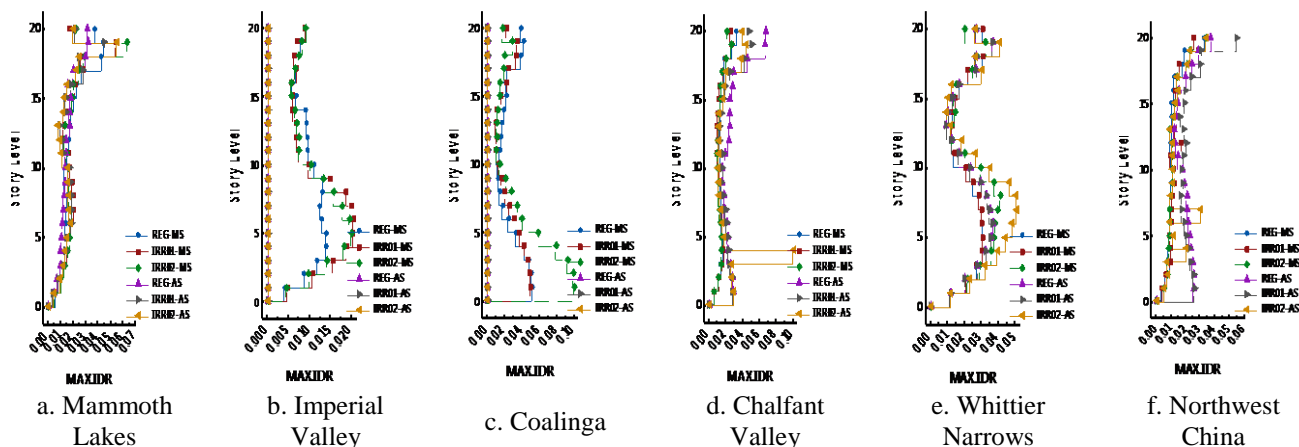


Fig. 15. Maximum inter story drift of regular and irregular 20 story structures under seismic sequence.

سازه‌ها موجب افزایش مقاطع سازه و در نتیجه بهبود رفتار آنها شده است. با این حال پارامترهایی چون ایجاد پیچش در سازه تحت زلزله‌ها به دلیل نامنظمی موجب تضعیف رفتارشان می‌شود.

با بررسی شکل (۱۵) که نتایج جابه‌جایی نسبی طبقات را برای سازه ۲۰ طبقه ارائه می‌دهد، محتوای فرکانسی زلزله از عوامل مهم تاثیر گذار بر رفتار سازه است که در صورتی که به فرکانس سازه نزدیک باشد، به ویژه در مورد پس‌لرزه‌ها موجب آسیب شدیدتر در سازه می‌شود. سازه نامنظم ۲ جابه‌جایی نسبی بیشتری را نسبت به سازه‌های دیگر از خود نشان می‌دهد و بنابراین در نظر گرفتن ضوابط ویژه‌ای برای این دست از سازه‌ها علاوه بر قوانین آیین‌نامه‌ای مخصوصاً وقتی در مناطق لرزه‌خیزی بالا قرار می‌گیرند، نیاز است و لزوم بررسی توالی زلزله در این نوع سازه‌ها مهم به حساب می‌آید.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی سازه‌های نامنظم هندسی در پلان ۸، ۱۲ و ۲۰ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه تحت توالی زلزله پرداخته شده است. توالی زلزله طیف گسترده‌ای از پارامترهای حرکت زمین را تشکیل می‌دهد. پاسخ سازه‌ها علاوه بر سازه منظم در دو حالت نامنظمی متوسط و شدید با تورفتگی به ترتیب به اندازه ۲۵٪ و ۵۰٪ از طول ساختمان تحت نام‌های نامنظمی ۱ و نامنظمی ۲ بررسی شد. سطح تفاوت بر حسب پارامترهای جابه‌جایی بام، جابه‌جایی نسبی

در مواردی که سازه تحت رکورد اول وارد محدوده غیر خطی شود نمی‌توان با اطمینان بیان کرد که رکورد دوم حتما باعث افزایش پاسخ‌ها به همان مقداری که به تنهایی به سازه سالم اعمال می‌شود، باشد. زیرا با توجه به این موضوع که وقتی سازه وارد محدوده غیر خطی می‌شود زمان تناوب سازه تغییر می‌کند و ممکن است باعث شود پدیده افزایش پاسخ (تشدید) در سازه رخ ندهد و فرکانس‌های رکورد زلزله با فرکانس‌های سازه اختلافات بیشتری پیدا کنند.

شکل‌های (۱۳ - ۱۵) بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقات را تحت زلزله اصلی (MS) و پس لرزه (AS) ارائه می‌کنند. جابه‌جایی نسبی در صورت افزایش می‌تواند نشان دهنده ضعف سیستم سازه‌ای در آن محدوده باشد. محور افقی بیانگر بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقات است.

در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود سازه ۸ طبقه تحت توالی زلزله‌های امپریال‌والی و کولینگاه در طبقات پایین دچار خرابی شده است. همچنین توالی لرزه‌ای کالفانت‌والی و نورثوست بیش‌ترین تاثیر را بر افزایش جابه‌جایی نسبی طبقات دارند. همانطور که مشاهده می‌شود چه تحت زلزله اصلی و یا تحت توالی زلزله سازه نامنظم ۲ بیش‌ترین جابه‌جایی نسبی را داشته و رفتار سازه نامنظم ۱ به رفتار سازه منظم نزدیک است.

شکل (۱۴) بیش‌ترین جابه‌جایی نسبی طبقات را برای سازه ۱۲ طبقه نشان می‌دهد. با بررسی نتایج سازه‌های نامنظم متوجه می‌شویم که ضوابط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای برای این دست از

جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات بیشتری از خود بر جای گذاشت.

با توجه به نتایج جابه‌جایی نسبی طبقات، سازه نامنظم ۲ جابه‌جایی نسبی بیش‌تری را نسبت به سازه‌های دیگر از خود نشان می‌دهد و بنابراین در نظر گرفتن ضوابط ویژه‌ای برای این دست از سازه‌ها علاوه بر قوانین آیین‌نامه‌ای مخصوصاً وقتی در مناطق لرزه‌خیزی بالا قرار می‌گیرند، نیاز است و لزوم بررسی توالی زلزله در این نوع سازه‌ها مهم به حساب می‌آید.

## References

## ۸- مراجع

- [1] Yeo, G.L. and C.A. Cornell, 2005. *Stochastic characterization and decision bases under time-dependent aftershock risk in performance-based earthquake engineering*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [2] Hosseinpour, F. and A. Abdelnaby, 2017. *Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92: p. 706-725.
- [3] Hatzigeorgiou, M. and G.D. Hatzigeorgiou, 2015. *Seismic sequence effects on three-dimensional reinforced concrete buildings*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 72: p. 77-88.
- [4] Abdelnaby, A.E. 2017, *Fragility curves for RC frames subjected to Tohoku mainshock-aftershocks sequences*. Journal of Earthquake Engineering: p. 1-19.
- [5] Zhang, Y., Chen, J., & Sun, C. 2017. *Damage-based strength reduction factor for nonlinear structures subjected to sequence-type ground motions*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92, 298-311.
- [6] Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (Standard no. 2800), 4th Edition, 2014 Road, Housing and Urban development Research Center, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran.
- [7] CSI, C, 2016. *Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Computers and Structures, Inc., California, USA.
- [8] Iranian National Building Code, Part 10, 2013, *Design and Construction of Steel Structures*, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran.
- [9] Iranian National Building Code, Part 6, 2013, *Design Loads for Buildings*, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran.
- [10] Computers and Structures Inc. (CSI), PERFORM-3D, 2011, *Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3- D Structures*, Structural and Earthquake Engineering Software, Version 5, Berkeley, CA, USA.
- [11] Abdelnaby, A. (2012), *Multiple earthquake effects on degrading reinforced concrete structures*. University of Illinois at Urbana-Champaign.

ماندگار و جابه‌جایی نسبی طبقات ارائه گردید. نتایج به دست آمده به صورت زیر است.

مشخص شد که سازه‌های منظم، نامنظم ۱ و نامنظم ۲ تحت اثر زلزله‌های متوالی پاسخ‌های غیرقابل پیش‌بینی و بعضاً بسیار شدیدی به پس‌لرزه‌ها داشته‌اند که موجب تخریب کلی این سازه‌ها می‌شود.

در این پژوهش مشخص شد که تقریباً اکثر پس‌لرزه‌ها موجب افزایش قابل توجه جابه‌جایی بام می‌شوند. در بیشتر موارد اگر سازه وارد محدوده غیر خطی شود مقدار جابه‌جایی‌های بام آن تحت پس‌لرزه افزایش می‌یابد. سازه نامنظم ۱ و نامنظم ۲ به ترتیب بیشتر و بیشترین جابه‌جایی بام را در سازه تجربه کردند. با این حال پراکندگی در نتایج نیز تا حدودی مشهود است. این پراکندگی می‌تواند ناشی از انتخاب رکوردها باشد. هر رکورد زلزله با سه مشخصه اصلی شامل مقادیر بیشینه مانده (PGA)، محتوای فرکانسی و مدت زمان حرکت قوی زمین با رکوردهای دیگر متمایز می‌شود. نزدیک بودن این سه مشخصه رکوردهای انتخابی به هم برای کاهش پراکندگی ضروری است.

در مواردی که سازه تحت رکورد اول وارد محدوده غیر خطی شود نمی‌توان با اطمینان بیان کرد که رکورد دوم حتماً باعث افزایش پاسخ‌ها به همان مقداری که رکورد دوم به تنهایی به سازه سالم اعمال می‌شود، گردد زیرا با توجه به این موضوع که وقتی سازه وارد محدوده غیر خطی می‌شود، زمان تناوب سازه تغییر می‌کند و ممکن است، باعث شود پدیده افزایش پاسخ (تشدید) در سازه رخ ندهد و فرکانس‌های رکورد زلزله با فرکانس‌های سازه اختلافات بیشتری پیدا کنند بنابراین برای بررسی‌های بیشتر باید دید که زلزله متوالی اعمال شده در چه محدوده فرکانسی قرار دارد و چه فرکانس‌هایی را بیشتر تحریک می‌کند.

سازه منظم ۱ مقادیر مشابه سازه منظم را نتیجه می‌دهد ولی از تاثیر فرکانس زلزله بر سازه نمی‌توان چشم‌پوشی کرد که در مواردی موجب افزایش جابه‌جایی نسبی ماندگار سازه منظم می‌شود. سازه نامنظم ۲ به دلیل شدیدتر بودن نامنظمی در این سازه رفتاری ناپایدارتر تحت توالی زلزله از خود نشان داد و

# The effect of earthquake aftershocks on the steel buildings with irregular plan

Pezhman Kakovan<sup>1</sup>, Taha Bakhshpoori<sup>2\*</sup>, Saied Pourzeinali<sup>3</sup>

- 1- M.Sc., Structure Engineering, Islamic Azad University of Ramsar
- 2- Faculty of Technology and Engineering, Department of Civil Engineering, East of Guilan, University of Guilan, Rudsar-Vajargah, Iran.
- 3- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

\*tbakhshpoori@guilan.ac.ir

## Abstract:

Earthquake sequences occur at many regions around the world where complex fault systems exist. These fault systems usually do not relieve all accumulated strains at once when the first rupture takes place. Therefore, high stresses formed at different locations causing sequential ruptures until the fault system is completely stabilized. The sequential ruptures along the fault segment(s) lead to multiple earthquakes which are often hard to distinguish them as fore, main and after-shocks, or a sequence of earthquakes from proximate fault segments. The most recent one sequences occurred are two foreshocks of magnitude 6.2 and 6 followed by a magnitude 7 main shock between 14 and 15 April 2016 caused severe damage and injuries. The event of two earthquakes by magnitude 2.6 and 6, which rocked the cities of Ahar, Varzaghan and Harris in East Azerbaijan in Iran in August 2012, is also a seismic sequence. Field investigations reported failure of structural systems under earthquake sequences, especially where structural retrofitting was not provided due to the short time between the earthquake sequences. In most failure cases the reported damage is mainly due to loss of stiffness and strength of structural elements as a result of material deterioration under earthquake sequences loadings. Buildings may have different configurations depending on the construction location and have different plan dimensions that would lead to irregularity in their planning. Limited research has addressed the seismic behavior of structures subjected to earthquake sequences especially irregular structures.

This study investigates the effect of earthquake aftershocks on the steel buildings with irregularity in plan. For this purpose, we studied on structures of 8, 12 and 20 number of stories with special steel frame system under the earthquake sequences. Each of these structures consists of three cases: regular, irregular 1, and irregular 2 models that were designed in accordance to Iranian codes by SAP 2000 software. Geometric irregularities in the plan of the structure created in accordance to Iran's seismic code, a recess should be created in proportion to more than 2% of the total length of the building. In this paper, first irregularity has a recess by 5 meters (one span) and the second irregularity with a recess by 10 meters (two spans), which is 25% and 50% of the length of the building, respectively. The spectral dynamical analysis method has been used to design the structures. For nonlinear analysis, we use Perform-3D software, In Perform-3D, a frame element is used to model beams and columns. Then these structures were evaluated by nonlinear dynamic analysis under actual earthquake sequences. Six sequential earthquake categories that have a major earthquake spacing with corresponding aftershock occurred in less than a week in the area were selected from the PEER (Earthquake Strength Database). Finally, after discussion on parameters such as roof displacement, residual inter story drift and maximum inter story drift, it is observed that aftershock leads to increasing the response of the structures and as a result failure under aftershock. By increasing the irregularity in the plan, the instability of the structure increases under aftershock, which may cause structural failure.