

بررسی میزان مقاومت سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی در مقابل خرابی پیش‌رونده تحت اثر زلزله

جعفر کیوانی* (دانشیار)

مجید منصوری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۵۴-۴۷

خرابی پیش‌رونده پدیده‌ی است که در آن خرابی جزئی محلی از المانی به المان دیگر گسترش می‌یابد و نهایتاً باعث خرابی کل سازه یا گسترش غیرمتجانس خرابی اولیه می‌شود. این نوع خرابی در سازه‌های لوله‌ی و تحت اثر بار زلزله تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این نوشتار خرابی پیش‌رونده در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی تحت اثر بارهای لرزه‌ی بررسی شده است. به این منظور ۳ تیپ سازه‌ی لوله در لوله‌ی فولادی با فواصل ستون‌های ۲، ۲/۶۷ و ۳/۲ متر و تعداد طبقات ۳، ۴۵ و ۶۰ طبقه مدل‌سازی شده‌اند. آنالیز انجام شده به صورت دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی بوده است. نتایج آنالیزهای صورت‌گرفته نشان می‌دهد که در سازه‌های ۳ و ۴۵ طبقه، با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها پتانسیل خرابی پیش‌رونده افزایش می‌یابد. علت این امر شکل‌گیری مفاصل خمیری در طبقات پایینی سازه و وجود تأخیر برشی منفی در طبقات بالای سازه است. در سازه‌ی ۶۰ طبقه با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها تا ۳/۲ متر، پتانسیل خرابی پیش‌رونده به علت توزیع مفاصل خمیری در ارتفاع سازه و عدم وجود تأخیر برشی منفی در سازه کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده، سازه‌ی لوله در لوله‌ی فولادی، سطح عملکرد سازه، آنالیز غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی، زوج شتاب‌نگاشت.

jkeyvani@khu.ac.ir
mansoori303@yahoo.com

۱. مقدمه

خرابی پیش‌رونده در طول زمان و در آیین‌نامه‌های مختلف به صورت‌های گوناگون تعریف شده است، ولی اصولاً پدیده‌ی که در آن خرابی جزئی محلی از المانی به المان دیگر گسترش می‌یابد و نهایتاً باعث خرابی کل سازه یا گسترش غیرمتجانس خرابی اولیه می‌شود به عنوان خرابی پیش‌رونده شناخته می‌شود. خرابی پیش‌رونده یک مکانیزم خرابی سازه‌ی فاجعه‌بار است. در ابتدا این پدیده توجه مهندسان سازه را پس از خرابی ناگهانی برج آپارتمان ۲۲ طبقه رونان پوینت^۱ در شهر کانینگ^۲ انگلیس در ۱۶ می ۱۹۶۸ به خود جلب کرد. علت خرابی ساختمان مذکور، خطای انسانی و انفجار گاز بود که پانل‌های بتنی نزدیک گوشه‌ی طبقه‌ی ۱۱۸ را ویران کرد. خرابی آن المان باعث خرابی طبقات بالاتر شد. پس از آن آیین‌نامه‌های ساختمانی در بسیاری کشورها به‌روز شد تا شامل قوانین ممانعت از این نوع خرابی شود.

در طی حدود سه دهه از گسترش مطالعه روی خرابی پیش‌رونده، موارد دیگری از خرابی پیش‌رونده‌ی سازه در اوکلاهاماسیتی آمریکا در ۱۹ آوریل ۱۹۹۵ رخ داد. ساختمان اداری آلفرد پ. مورای^۳، که بر اثر انفجار خودروی بمب‌گذاری شده به ۳ ستون تراز همکف برخورد کرده و سپس خرابی پیش‌رونده در تمام ساختمان رخ داده بود، ویران شد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۵/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۹، پذیرش ۱۳۹۲/۷/۲۱.

جهان یک بار دیگر وقتی ساختمان مرکز تجارت جهانی^۴ در شهر نیویورک آمریکا بر اثر برخورد هواپیمای جت در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ تخریب شد، شوکه شد. این ۳ حادثه، مرحله‌ی مهمی در گسترش آیین‌نامه‌ها و استانداردها برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده‌ی ساختمان‌هاست.

در «بهترین عملکرد برای کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌ها» که توسط مؤسسه مالی استاندارد و فناوری (NIST)^۵ منتشر شده است، بارهای خطر غیرعادی که می‌تواند منجر به خرابی پیش‌رونده شود، به این صورت دسته‌بندی شده‌اند: برخورد هواپیما، خطای طراحی و اجرا، آتش، انفجار گاز، بار زیاد تصادفی یاد، متریاال پرخطر، تصادف خودرو، انفجار بمب و... از آنجا که این خطرات کمترین احتمال رخداد را دارند، ممکن است در طراحی سازه‌ی مورد توجه قرار نگیرند. اغلب آنها مشخصات عمل در زمان کوتاه، مقدار بزرگ و پاسخ‌های دینامیکی دارند.

بر اساس مطالب قبل مشخص است که تاکنون مطالعه و بررسی جامعی در مورد خرابی پیش‌رونده در سازه‌های لوله در لوله‌ی تحت اثر بارهای لرزه‌ی صورت پذیرفته است. پژوهش‌های گذشته در مورد سازه‌های لوله‌ی منحصر به سازه‌ی لوله‌ی خارجی و حذف گزینشی المان‌های ستون در طبقه‌ی اول بوده است. حال آنکه در جریان وقوع زلزله، المان‌هایی که دچار خرابی شده‌اند، از قبل قابل پیش‌بینی نیستند. لذا لازم است با افزایش نیروی جانبی لرزه‌ی (در اینجا از طریق افزایش ضریب شتاب‌نگاشت اعمالی به سازه) روند شکل‌گیری مفاصل خمیری در این نوع

سازه‌ها کنترل و منطبق با این نتایج در مورد حذف یا جایگزینی المان‌ها تصمیم‌گیری کرد.

در این مطالعه، با توجه به خاصیت دینامیکی بارهای لرزه‌ی و نکات ذکر شده در باره‌ی دقت و صحت انواع آنالیزها از روش آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی و نیز جهت بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های لوله در لوله از ۳ مدل سازه‌ی با تعداد طبقات ۳۰، ۴۵ و ۶۰ و فاصله‌ی محور به محور ستون‌های ۲، ۲/۶۷ و ۳/۲ متر استفاده شده است. لذا با توجه به نتایج به دست آمده، امکان مقایسه‌ی رفتار این نوع سیستم سازه‌ی با نظر ارتفاع سازه و فاصله‌ی ستون‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده میسر خواهد شد.

۲. طراحی سازه‌های مدل

در این مطالعه، سه مدل سازه‌ی لوله در لوله فولادی با تعداد طبقات ۳۰، ۴۵ و ۶۰ در نظر گرفته شده است، چرا که تعداد طبقات متفاوت امکان بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده با تغییر ارتفاع سازه‌ها را ممکن خواهد ساخت. همچنین هر کدام از سازه‌ها، سه مدل پلان دارند. در یکی از پلان‌ها، فاصله‌ی محور به محور ستون‌های خارجی و داخلی ۲ متر و در ۲ پلان دیگر، این فاصله به ترتیب ۲/۶۷ و ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. فواصل متفاوت ستون‌ها، امکان بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده با تغییر فواصل ستون‌ها را میسر می‌سازد. بر این اساس ۹ مدل سازه‌ی توسط آنالیز دینامیکی غیرخطی طراحی شده است، که در ادامه روند طراحی آنها به تفصیل بیان شده است. در شکل‌های ۱ تا ۳، پلان سه مدل سازه و ارتفاع آنها ارائه شده است.

بار لرزه‌ی به صورت تاریخچه‌ی زمانی (شتاب‌نگاشت) به سازه‌های مدل اعمال شده است. از آنجا که بر اساس پژوهش‌های پیشین، آنالیز دینامیکی غیرخطی نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را نشان می‌دهد، از این روش برای آنالیز و طرح سازه‌ها استفاده شده است.

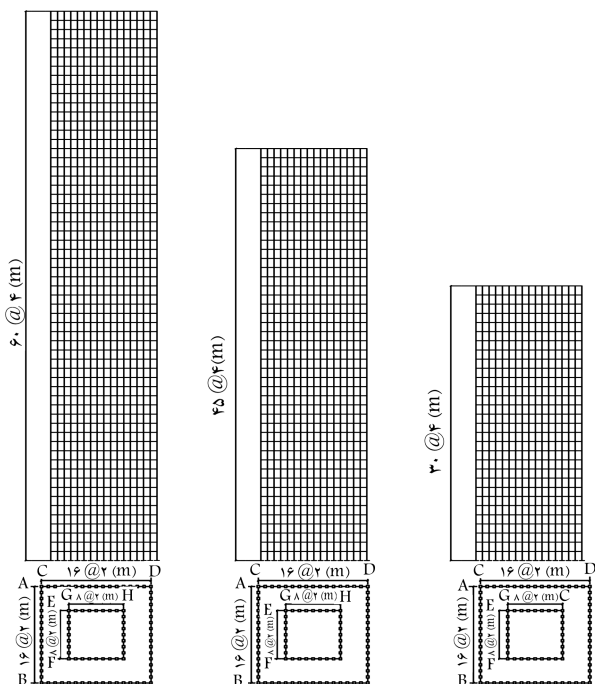
فاصله‌ی کف به کف طبقات ۴ متر و سقف هر طبقه به صورت دال بتنی مسلح با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. سازه‌ها واقع در کشور ایران و شهر تهران فرض شده‌اند. برای تأمین بیشینه‌ی دقت مورد نیاز، کلیه‌ی آنالیزها به صورت دینامیکی غیرخطی و با استفاده از شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ساخت‌گاه انجام شده است. برای دست‌یابی به این مسئله از نرم‌افزار PERFORM ۳D (V.۴) استفاده شده است.

۱.۲. تعیین بارهای طراحی

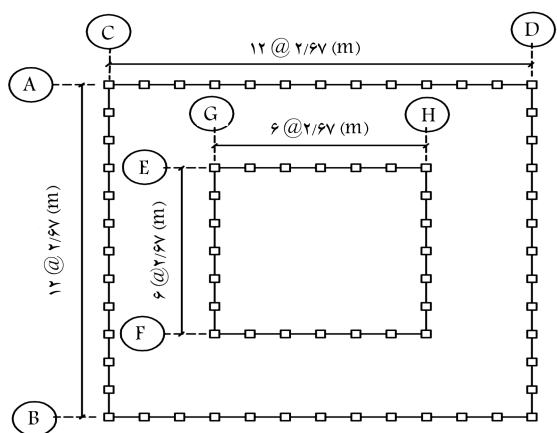
به طور کلی بارهای طراحی سازه‌های مدل دو دسته‌اند: بارهای ثقلی و بارهای لرزه‌ی.

۱.۱.۲. بارهای ثقلی

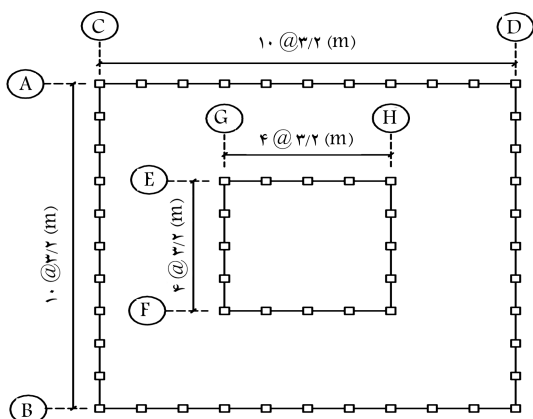
برای تعیین بارهای ثقلی از نشریه‌ی ۵۱۹ و مبحث ششم مقررات ملی ساختمانی ایران استفاده شده است.^[۱] در محاسبه‌ی بارهای مرده و زنده سعی شده است نهایت ساده‌سازی انجام شود. بر این اساس دیوارهای پیرامونی با وزن واحد ۴۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده‌اند، که بیشینه‌ی آنها پوشیده از شیشه هستند. لذا به صورت تقریبی حدود ۱۵٪ وزن دیوارها به عنوان وزن مؤثر در نظر گرفته شده است. وزن متوسط تیرها و ستون‌ها نیز به ترتیب ۳۲۰ و ۶۵۰ کیلوگرم بر متر طول المان‌ها لحاظ شده است. پارتیشن‌های داخلی با ارتفاع ۳ متر و وزن واحد ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع فرض شده است، که حدود ۳۰۰ متر طول در کل پلان سازه دارد. بار مرده‌ی پام نیز با فرض دال بتنی سقف به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و دیوار



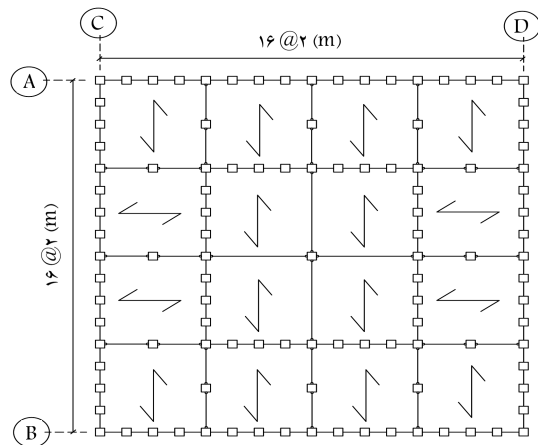
شکل ۱. پلان و نمای سازه‌های مدل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ طبقه با فواصل ستون ۲ متر.



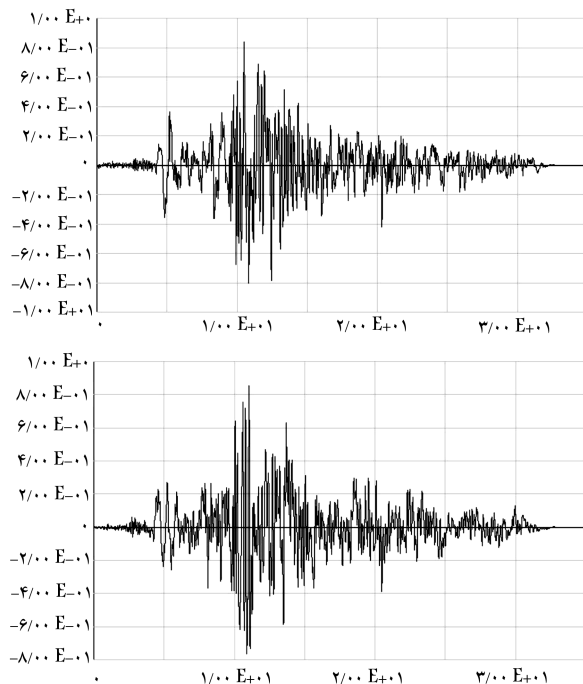
شکل ۲. پلان سازه‌های مدل با فواصل ستون ۲/۶۷ متر.



شکل ۳. پلان سازه‌های مدل با فواصل ستون ۳/۲ متر.



شکل ۴. توزیع بارهای ثقلی روی تیرهای پلان سازه.



شکل ۵. رکورد شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طَبَس در دو امتداد متعامد (شتاب در مقابل زمان).

در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی مورد بحث در اینجا، کلیه‌ی اتصالات تیر به ستون به صورت صلب در نظر گرفته شده است. شکل ۶، منحنی نیرو - تغییرشکل تعمیم‌یافته برای اعضاء و اجزاء فولادی را نشان می‌دهد.

براساس استاندارد ملی ۲۸۰۰ ایران (طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله)، بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی در سازه‌های با دوره‌ی تناوب بالای ۰٫۷ ثانیه باید کوچک‌تر از ۲/۰ ارتفاع طبقه باشد.^[۳]

با این ایده که سطح عملکرد کل ساختمان خدمت‌رسانی بی‌وقفه یا استفاده‌ی بی‌وقفه باشد، کلیه‌ی اجزاء سازه‌ی شامل ستون‌ها و تیرها باید برای سطح عملکرد ۱ یعنی قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه طراحی شوند. تنش تسلیم مصالح ستون‌ها و تیرها معادل ۳۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده است.

شکل‌های ۷ و ۸ منحنی نیرو - تغییرشکل تعمیم‌یافته به ترتیب برای ستون‌ها و

جان‌پناه پیرامونی به ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و وزن واحد ۳۸۵ کیلوگرم بر مترمربع و وزن متوسط تیرها و ستون‌ها به ترتیب ۲۴۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر متر طول در نظر گرفته شده است. با فرض کاربری اداری و سهولت مدل‌سازی، بار زنده‌ی طبقات ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. در خصوص بار زنده‌ی بام نیز با توجه با اینکه تهران منطقه‌ی با احتمال بارش زیاد برف است، بار زنده‌ی بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع است.

براساس موارد ذکرشده، بار مرده و زنده‌ی طبقات و بام به این شرح است:

- بار مرده‌ی طبقات = ۹۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع،
- بار مرده‌ی بام = ۶۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع،
- بار زنده‌ی طبقات = ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع،
- بار زنده‌ی بام = ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع.

توزیع بارهای ثقلی روی تیرهای پلان سازه در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲.۱.۲. بارهای لرزه‌ی

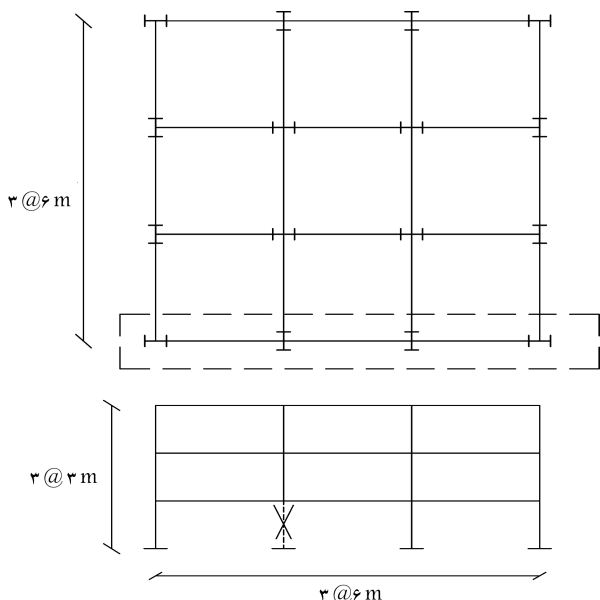
با توجه به اینکه آنالیز به صورت دینامیکی غیرخطی و با استفاده از تاریخچه‌ی زمانی شتاب (شتاب‌نگاشت) انجام شده است، لذا براساس بند ۶-۲-۶-۱-۴ میسث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، ۳ زوج شتاب‌نگاشت که با مشخصات منطقه‌ی طرح مشابه دارند، به گونه‌ی انتخاب شده‌اند که به لحاظ بزرگا، فاصله از گسل و ساز و کار چشمه‌ی لرزه‌زا و مشخصات زمین‌شناختی و لایه‌های خاک با محل طرح مشابه باشند. لذا ۳ زوج شتاب‌نگاشت زلزله‌های طَبَس، Cape و Chi-Chi Mendocino به عنوان شتاب‌نگاشت‌های ساخت‌گاه انتخاب و مطابق با روش ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ۲۸۰۰ مقیاس شده‌اند. در شکل ۵، شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طَبَس در دو امتداد متعامد نشان داده شده است، که از نوع حوزه‌ی نزدیک است. بنابراین در ادامه‌ی پژوهش نتایج حاصل از اثر این شتاب‌نگاشت بر سازه‌های مدل ارائه شده است.

۲.۲. روش مدل‌سازی سازه‌های مدل در نرم‌افزار

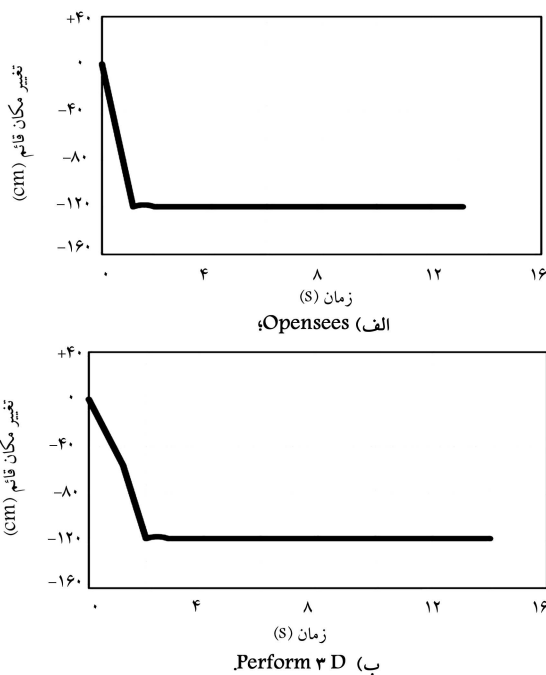
امروزه با توجه به کاربرد گسترده و روزافزون تحلیل غیرخطی در پروژه‌های تحقیقاتی و بهسازی سازه‌های موجود و ارزیابی آنها و ارائه‌ی روش جدید طراحی براساس سطح عملکرد توسط آیین‌نامه‌های معتبر جهان، استفاده از نرم‌افزارهای قدرتمند که توانایی انجام تحلیل‌های غیرخطی را دارند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. نرم‌افزار ۳D Perform این قابلیت را دارد که سازه‌ها را براساس سطوح مختلف عملکرد و با رفتار غیرخطی به صورت دینامیکی آنالیز کند و نیز نتایج آنالیز را به صورت تصاویر تغییرمکان جانبی، تاریخچه‌ی زمان پاسخ‌های گره‌ها و المان‌ها و چرخه‌های هیستریزس برای اجزاء غیرخطی ارائه کند. همچنین فضای گرافیکی نسبتاً مطلوب نرم‌افزار دید بهتری را برای مدل‌سازی و تفسیر نتایج ایجاد می‌کند.

مهم‌ترین گام در مدل‌سازی سازه‌ها، تعیین مشخصات المان‌ها و اجزاء آنهاست. با توجه به اینکه مدل تحلیلی غیرخطی است، لذا دقت در تعریف مشخصات مصالح و هندسه‌ی آنها ضروری است. برای این منظور از دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود (نشریه‌ی ۳۶۰) استفاده شده است.^[۱]

از آنجا که نرم‌افزار قابلیت تحلیل براساس سطوح عملکردی را دارد، برای تحلیل سازه از ۳ سطح عملکرد استفاده شده است. این سطوح عملکرد شامل عملکرد بی‌وقفه (IO)، عملکرد امنیت جانی (LS) و عملکرد جلوگیری از تخریب (CP) است.

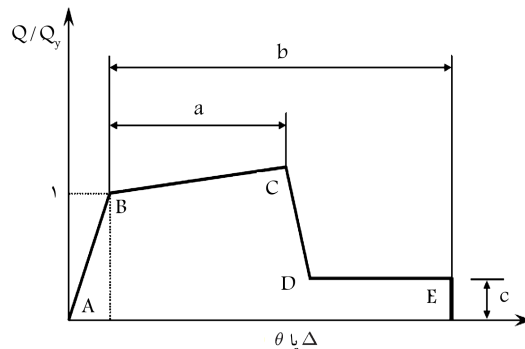


شکل ۹. پلان و نمای قاب سازه‌ی ۳ طبقه با ستون حذف شده در طبقه‌ی اول.

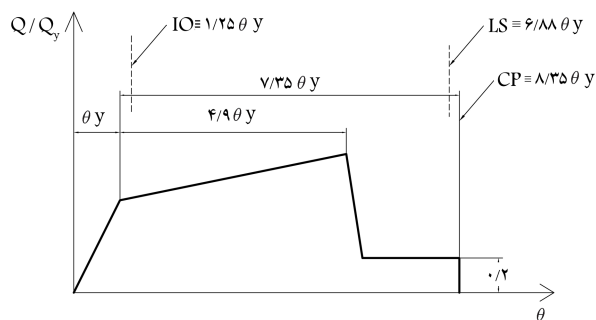


شکل ۱۰. مقایسه‌ی تغییر مکان قائم سازه‌ی قاب خمشی فولادی ۳ طبقه پس از حذف ستون طبقه‌ی اول توسط نرم افزارهای OpenSees و Perform 3D.

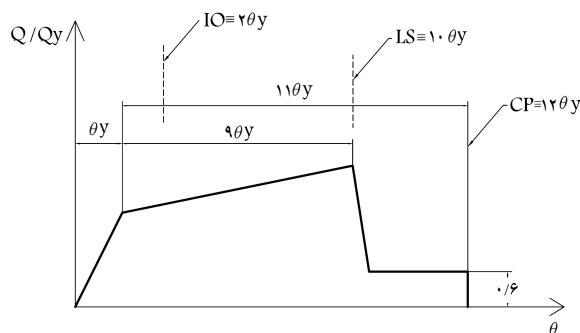
ستون‌های طبقه‌ی اول در یکی از قاب‌ها حذف و سازه مجدداً تحت اثر بارهای ثقلی، که به صورت تاریخیچه‌ی زمانی بر سازه وارد شده‌اند، آنالیز دینامیکی غیرخطی شده است. پلان و نمای قاب سازه‌ی ۳ طبقه، که در آن ستون طبقه‌ی اول حذف شده است، در شکل ۹ نشان داده شده است. پیشینه‌ی تغییر مکان قائم سازه، که در نوشتار مذکور به آن اشاره شده است، حدود ۱۲۰ سانتی‌متر و آنالیز توسط نرم‌افزار OpenSees انجام شده است. قاب اشاره شده با نرم‌افزار Perform 3D مدل و سپس آنالیز شده است. پیشینه‌ی تغییر مکان قائم سازه حاصل از این آنالیز حدود ۱۱۸ سانتی‌متر و نتایج دو آنالیز در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۶. منحنی نیرو- تغییر شکل تعمیم یافته برای اجزاء فولادی.



شکل ۷. منحنی نیرو- تغییر شکل تعمیم یافته برای ستون‌ها.



شکل ۸. منحنی نیرو- تغییر شکل تعمیم یافته برای تیرها.

تیرها براساس نشریه‌ی ۳۶۰ ایران را نمایش می‌دهد.

نرم‌افزار نسبت‌های کاربردی در هر دسته از سطوح عملکردی را با طیف رنگی روی المان‌ها مشخص می‌کند. با استفاده از این قابلیت می‌توان به سادگی وضعیت المان‌ها را بررسی کرد. المان‌هایی که از نسبت‌های کاربردی سطوح عملکردی مورد نظر تجاوز کرده‌اند، با مشخصات مقاطع جدید جایگزین و مجدداً آنالیز انجام می‌شود. در جدول ۱، مشخصات المان‌های تیر و ستون نهایی در سازه‌ی لوله در لوله‌ی ۶۰ طبقه با فواصل ستون‌های ۲ متر نشان داده شده است. کلیه‌ی ستون‌ها دارای مقطع قوطی‌شکل توخالی و تیرها مقاطع I شکل عمیق هستند.

۳.۲. صحت‌سنجی نرم‌افزار

برای کنترل صحت عملکرد نرم‌افزار Perform 3D، نوشتاری با عنوان «طراحی قاب‌های خمشی فولادی با در نظر گرفتن خرابی پیش‌رونده» مورد توجه و آنالیز قرار گرفته است،^[۴] که در آن قاب‌های خمشی فولادی به صورت سازه‌های ۳ و ۹ طبقه براساس الزام‌های آیین‌نامه برای تحمل بارهای لرزه‌ی طراحی و سپس یکی از

جدول ۱. مشخصات المان‌های تیر و ستون در سازه‌ی لوله در لوله‌ی ۶۰ طبقه مدل با فواصل ستون ۲ متر.

| نوع مقطع | شماره‌ی طبقات | مقاطع در لوله‌ی خارجی | مقاطع در لوله‌ی داخلی |
|----------------------------|---|---|---|
| ستون (قطری توخالی) □ | ۱۰-۱ | $C 60 \times 60 \times 8$ | $C 60 \times 60 \times 8$ |
| | | $C 60 \times 60 \times 6$ | $C 60 \times 60 \times 6$ |
| | | $C 60 \times 60 \times 5$ | $C 60 \times 60 \times 5$ |
| | | $C 55 \times 55 \times 5$ | $C 55 \times 55 \times 5$ |
| | ۲۰-۱۱ | $C 60 \times 60 \times 6$ | $C 60 \times 60 \times 6$ |
| | | $C 60 \times 60 \times 5$ | $C 60 \times 60 \times 5$ |
| | ۳۰-۲۱ | $C 60 \times 60 \times 5$ | $C 60 \times 60 \times 5$ |
| | | $C 55 \times 55 \times 5$ | $C 55 \times 55 \times 5$ |
| | ۴۰-۳۱ | $C 55 \times 55 \times 5$ | $C 55 \times 55 \times 5$ |
| | | $C 50 \times 50 \times 5$ | $C 50 \times 50 \times 5$ |
| ۵۰-۴۱ | $C 50 \times 50 \times 5$ | $C 50 \times 50 \times 5$ | |
| | $C 50 \times 50 \times 4$ | $C 50 \times 50 \times 4$ | |
| ۶۰-۵۱ | $C 50 \times 50 \times 4$ | $C 50 \times 50 \times 4$ | |
| | $C 50 \times 50 \times 3$ | $C 50 \times 50 \times 3$ | |
| تیر (I شکل) I | ۱۰-۱ | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ |
| | | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 30 \times 70 \times 3,2 \times 2$ |
| | | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 30 \times 70 \times 1,8 \times 1,5$ |
| | | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 25 \times 60 \times 1,5 \times 1,2$ |
| | ۲۰-۱۱ | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ |
| | | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ |
| | ۳۰-۲۱ | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ |
| | | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ |
| | ۴۰-۳۱ | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ |
| | | $B 50 \times 100 \times 4,5 \times 3,5$ | $B 40 \times 80 \times 3,8 \times 2,2$ |
| ۵۰-۴۱ | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ | $B 45 \times 80 \times 3,8 \times 2,2$ | |
| | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ | $B 40 \times 80 \times 3,8 \times 2,2$ | |
| ۶۰-۵۱ | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ | $B 45 \times 80 \times 3,8 \times 2,2$ | |
| | $B 45 \times 100 \times 4,2 \times 2,5$ | $B 30 \times 70 \times 3,2 \times 2$ | |

ستون‌های میانی از تنش‌ها در ستون‌های گوشه تجاوز می‌کند، کمانش موضعی در بخش فشاری و ترک در بخش کششی قاب جهت بال ممکن است رخ دهد. در سازه‌های مدل به بررسی نیروی محوری ستون‌های قاب‌های خارجی و داخلی در ۲ جهت و در ۳ ارتفاع پرداخته‌ایم و از این طریق معیاری برای مقایسه‌ی عملکرد سازه‌ها به لحاظ فاصله‌ی محور به محور ستون‌ها و تعداد طبقات به دست آمده است.

در هر سازه‌ی مدل در طبقات اول، میانی و انتهایی این مقایسه انجام شده و نتایج حاصل از این مقایسه‌ها به این شرح است:

۱.۳. تأخیر برشی (مقایسه‌ی تأخیر برشی در ۳ سازه‌ی مدل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ طبقه)

-- در کلیه‌ی سازه‌های مدل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ طبقه، در طبقات بالاتر تأخیر برشی کاهش یافته و بیشترین تأخیر برشی در طبقات اول و کمترین مقدار آن در طبقات بالایی مشاهده شده است.

-- در سازه‌های ۴۵ و ۶۰ طبقه مدل با افزایش فاصله‌ی محور به محور ستون‌ها، میزان تأخیر برشی افزایش یافته است.

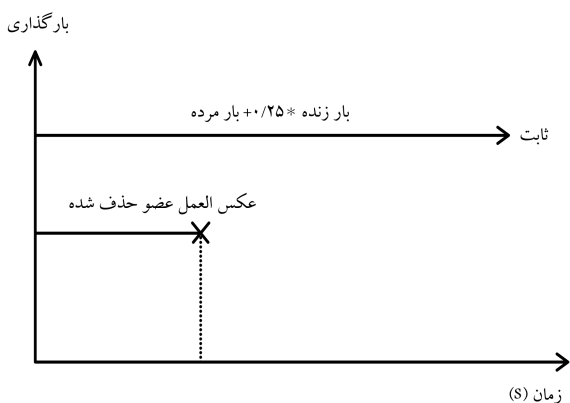
-- سازه‌های ۳۰ طبقه از روند فوق تبعیت نکرده‌اند. در سازه‌ی ۳۰ طبقه با فواصل ستون ۲٫۶۷ متر بیشترین و در سازه‌ی ۳۰ طبقه با فواصل ستون ۳٫۲ متر، کمترین تأخیر برشی ملاحظه شده است.

-- در سازه‌های ۳۰ و ۴۵ طبقه با افزایش فاصله‌ی محور به محور ستون‌ها، تأخیر

بر اساس تغییر مکان‌های مذکور، نتیجه‌ی آنالیز با نرم‌افزار ۳D Perform حدود ۱٫۷٪ خطا نسبت به آنالیز نوشتار با نرم‌افزار OpenSees را نشان می‌دهد، که با توجه به درصد اندک خطا، قابل چشم‌پوشی است.

۳. بررسی رفتار سازه‌های مدل از نظر تأخیر برشی و شکل‌گیری مفاصل خمیری در المان‌ها

قاب‌های لوله‌یی در معرض بار جانبی را می‌توان مانند تیر جعبه‌یی توخالی طره‌یی قائم که در زمین دارای اتصال گیردار است، مدل‌سازی کرد. برای قاب‌های لوله‌یی در معرض بار جانبی، نیروهای محوری در ستون‌های گوشه بزرگ‌تر است و توزیع آن برای قاب در جهت جان (قاب موازی جهت بار جانبی) و قاب در جهت بال (قاب عمود بر جهت بار جانبی) غیرخطی است. این بدان علت است که نیروهای محوری در ستون‌های میانی قاب در جهت بال، به دلیل طبیعت قاب لوله‌یی که متفاوت از لوله با دیوار صلب است، نسبت به ستون‌های گوشه دارای مقدار کمتری است. این پدیده که توزیع غیریکنواخت بار محوری در ستون‌های پیرامونی است، به منزله‌ی تأخیر برشی شناخته می‌شود. هدف طراحی بهینه‌ی قاب‌های لوله‌یی، محدود کردن اثر تأخیر برشی و کمک به رفتار طره‌گونه‌ی سازه است. تأخیر برشی مثبت به موردی اطلاق می‌شود که تنش‌ها در ستون‌های گوشه از تنش در ستون‌های میانی تجاوز کند. این مسئله منجر به تأییدن اسلب کف و سپس منجر به تغییر شکل پارتیشن‌های داخلی و سایر اجزاء درجه دو می‌شود. در مورد تأخیر برشی منفی، که تنش‌ها در



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمان بارهای اعمالی به سازه با المان حذف‌شده برای آنالیز دینامیکی.

اعضاء اصلی که از سطح عملکردی LS (ایمنی جانی) عبور کرده‌اند، با مفصلی که ظرفیت باربری خمشی آنها نسبت به اعضاء اصلی به میزان قابل ملاحظه‌ی کاهش یافته است، مدل‌سازی شده‌اند. میزان ظرفیت خمشی مفصل مدل‌شده در انتهای این المان‌ها به صورت رابطه‌های ۵ و ۶ است:

$$Q_{CE}(Column - LS) = 0.2Q_y \quad (5)$$

$$Q_{CE}(Beam - LS) = 0.6Q_y \quad (6)$$

در روابط قبل، عبارت‌های Q_{CE} ، Q_y ، Z ، F_{ye} ، P و P_{ye} به ترتیب ظرفیت خمشی خمیری مقاطع تیر و ستون، ظرفیت خمشی کشسان مقاطع تیر و ستون، مدول خمیری مقاطع، تنش تسلیم مؤثر مقاطع، نیروی محوری المان ستون در ابتدای آنالیز دینامیکی و نیروی محوری حد تسلیم المان ستون هستند.

همچنین اعضایی که از سطح عملکردی CP (آستانه‌ی فروریزش) عبور کرده‌اند، به طور کامل از سازه حذف و نیروهای موجود در آنها تحت اثر بارهای ثقلی وارده به سازه، به صورت دینامیکی به محل‌گره‌ی اتصال آنها اعمال شده‌اند. این راهکار برای امکان شبیه‌سازی حذف ناگهانی المان از سازه به کار رفته است. به این منظور بارهای موجود در اعضاء حذف‌شده در گره‌های اتصال آن اعمال و مطابق شکل ۱۱، طی زمان محدودی حذف شده‌اند. همان‌گونه که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، ترکیب بارهای ثقلی به صورت ثابت بر سازه اعمال شده‌اند.^[۵]

پس از مراحل فوق، تغییرمکان قائم و جانبی سازه کنترل می‌شود. در صورتی که سازه دچار جابجایی‌های بزرگ شود، خرابی پیش‌رونده در سازه به وجود آمده است. تضعیف باربری خمشی برخی المان‌ها و حذف برخی دیگر از آنها براساس روش بالا، باعث تغییر مسیر باربری سازه می‌شود. در صورتی که سایر اعضاء بتوانند بارهای اعمالی به سازه را تحمل کنند، خرابی پیش‌رونده رخ نخواهد داد.

۵. بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مدل

در این بخش عملکرد سازه‌های مدل در مقابل خرابی پیش‌رونده تحت اثر بارهای لرزه‌یی افزایش‌یافته مطابق با روش شرح داده‌شده در بخش ۴، بررسی و آنالیز شده است. به این منظور سازه‌های مدل تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌شده که با ضریب افزایش به سازه‌ها اعمال شده‌اند، آنالیز شده و تغییرمکان‌های قائم و جانبی آنها مورد توجه قرار گرفته است.

برشی منفی از طبقات میانی و در هر دو لوله‌ی داخلی و خارجی ایجاد شده و تا طبقات انتهایی نیز این روند ادامه یافته است.

-- در سازه‌های ۶۰ طبقه در هیچ‌یک از مدل‌ها تأخیر برشی منفی مشاهده نشده است. به این معنی که فاصله‌ی ستون‌ها تأخیری در ایجاد تأخیر برشی نداشته است.

۲.۳. روند شکل‌گیری مفاصل خمیری در المان‌های سازه (مقایسه‌ی روند شکل‌گیری مفاصل خمیری در ۳ سازه‌ی مدل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ طبقه)

در کلیه‌ی مدل‌های سازه‌یی با افزایش فاصله‌ی محور به محور ستون‌ها، روند شکل‌گیری مفاصل خمیری از طبقات بالاتر به طبقات پایین‌تر منتقل شده است. تمرکز مفاصل خمیری در نیمه‌ی پایینی سازه‌های مدل با فاصله‌ی ستون‌های بیشتر، باعث کاهش پایداری سازه در برابر بارهای جانبی شده است. در سازه‌ی ۶۰ طبقه با فواصل ستون ۳/۲ متر، مفاصل خمیری علاوه بر طبقات پایین، در طبقات بالایی سازه و به صورت محدود ایجاد شده است. در کلیه‌ی سازه‌ها با افزایش ضریب شتاب‌نگاشت مؤثر در سازه، مفاصل خمیری ابتدا در طبقات پایین‌تر تشکیل شده و به بالای سازه و تا طبقات میانی توسعه یافته‌اند.

در سازه‌های ۴۵ و ۶۰ طبقه با فاصله‌ی ستون‌های ۲/۶۷ متر، روند شکل‌گیری مفاصل خمیری تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مختلف چندان متفاوت نبوده و مفاصل اغلب در نیمه‌ی پایینی سازه‌ها متمرکز بوده است.

۴. روش آنالیز خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مدل

روش آنالیز برای بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها به این شکل است که سازه‌های مدل که برای شتاب‌نگاشت مقیاس‌شده طراحی شده‌اند، مجدداً با اعمال شتاب‌نگاشت‌های افزایش‌یافته آنالیز می‌شوند. تحت اثر بارهای لرزه‌یی جدید بعضی از اعضاء سطوح عملکردی تعریف‌شده را پشت سر می‌گذارند. به این معنی که تیرها و ستون‌ها از سطح عملکردی IO ، که همان قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه است، عبور کرده‌اند. به منظور مدل‌سازی مجدد سازه‌هایی که تحت تأثیر شتاب‌نگاشت‌های افزایش‌یافته قرار گرفته‌اند، اعضاء سازه‌یی (ستون‌ها و تیرها) که از سطح عملکردی IO (عملکرد بی‌وقفه) عبور کرده‌اند با مفصلی که ظرفیت باربری خمشی آنها نسبت به اعضاء اصلی کاهش یافته است، در هر دو انتها مدل‌سازی شده‌اند.

میزان ظرفیت خمشی مفاصل مدل‌شده در انتهای این المان‌ها به صورت روابط ۱ الی ۴ است:

برای ستون‌ها:

$$Q_{CE} = M_{CE} = \gamma_1 \gamma_2 Z F_{ye} [1 - \frac{P}{P_{ye}}] \leq Z F_{ye} \quad (1)$$

برای تیرها:

$$Q_{CE} = M_{CE} = Z F_{ye} \quad (2)$$

$$Q_{CE}(Column - IO) = \left[\frac{(Q_{CE} - 0.2Q_y)}{\gamma} \right] + 0.2Q_y \quad (3)$$

$$= 0.5Q_{CE} + 0.1Q_y$$

$$Q_{CE}(Beam - IO) = Q_{CE} \quad (4)$$

۳.۱.۵. سازه‌های مدل ۶۰ طبقه

نتایج آنالیزهای انجام شده روی این سازه‌ها و پتانسیل خرابی پیش‌رونده در آنها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها، بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی ۶۰ طبقه تا فاصله‌ی ستون‌های ۳/۲ متر افزایش و پس از آن کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها در این سازه تا ۳/۲ متر، پتانسیل خرابی پیش‌رونده کاهش یافته است.

۲.۵. بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مدل براساس

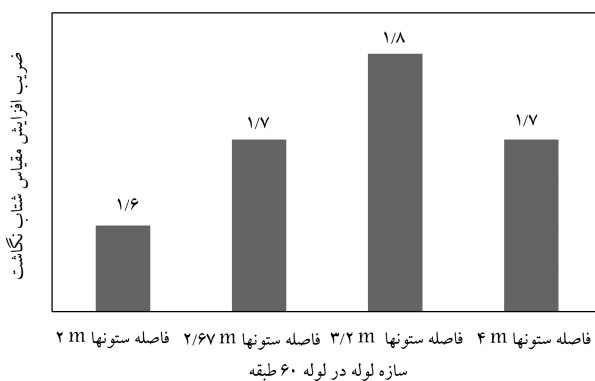
ارتفاع سازه‌ها

۱.۲.۵. سازه‌های با فواصل ستون ۲ متر

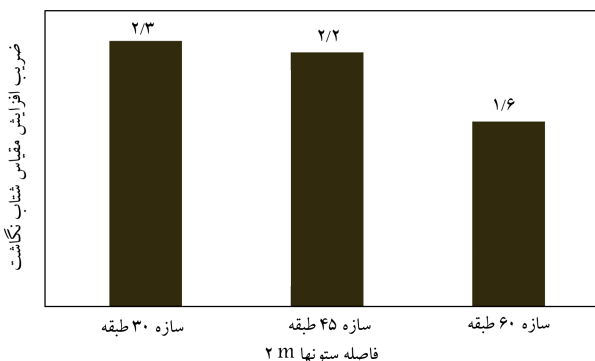
در شکل ۱۵، نمودار مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی با فواصل ستون ۲ متر و تعداد طبقات متفاوت نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور با افزایش تعداد طبقات پتانسیل، خرابی پیش‌رونده افزایش یافته است.

۲.۲.۵. سازه‌های با فواصل ستون ۲/۶۷ متر

در شکل ۱۶، نمودار مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی با فواصل ستون ۲/۶۷ متر و تعداد طبقات متفاوت نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور با افزایش تعداد طبقات از ۳۰ به ۴۵ طبقه، پتانسیل خرابی پیش‌رونده افزایش و از ۴۵ به ۶۰ طبقه پتانسیل خرابی پیش‌رونده کاهش یافته است.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های مدل ۶۰ طبقه‌ی لوله در لوله‌ی فولادی.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی مدل با فاصله‌ی ستون‌های ۲ متر.

براساس بررسی‌های انجام شده در رفتار سازه‌های مدل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ طبقه در برابر خرابی پیش‌رونده تحت اثر بارهای لرزه‌ی تاریخی‌ی زمانی، یک مقایسه براساس تأثیر فواصل محور به محور ستون‌ها در یک سازه‌ی مدل و مقایسه‌ی دیگر براساس تأثیر ارتفاع سازه‌های مدل بر پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مدل با فاصله‌ی ستون مشابه است.

۱.۵. بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مدل براساس

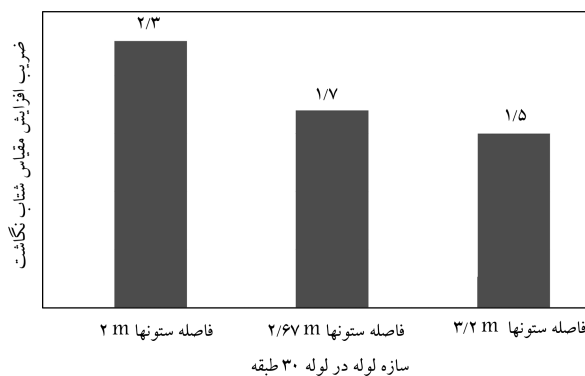
فواصل ستون‌ها

۱.۱.۵. سازه‌های مدل ۳۰ طبقه

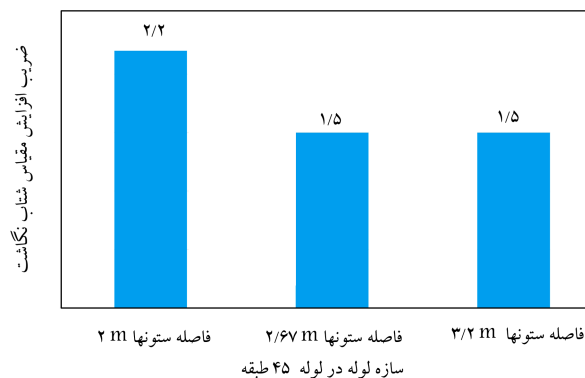
نتایج آنالیزهای انجام شده روی این سازه‌ها و پتانسیل خرابی پیش‌رونده در آنها، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها، بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی ۳۰ طبقه کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها در این سازه، پتانسیل خرابی پیش‌رونده افزایش یافته است.

۲.۱.۵. سازه‌های مدل ۴۵ طبقه

نتایج آنالیزهای انجام شده روی این سازه‌ها و پتانسیل خرابی پیش‌رونده در آنها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها، بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی ۴۵ طبقه کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها در این سازه، پتانسیل خرابی پیش‌رونده افزایش یافته است.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های مدل ۳۰ طبقه‌ی لوله در لوله‌ی فولادی.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های مدل ۴۵ طبقه‌ی لوله در لوله‌ی فولادی.

۶. نتیجه‌گیری

براساس مطالعات انجام شده در این نوشتار درباره‌ی میزان مقاومت سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی در مقابل خرابی پیش‌رونده تحت اثر بارهای لرزه‌ی مشخص شد که در سازه‌های با تعداد طبقات کمتر (۳۰ و ۴۵ طبقه)، با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها پتانسیل خرابی پیش‌رونده افزایش می‌یابد. علت این امر شکل‌گیری مفاصل خمیری در طبقات پایینی سازه و وجود تأخیر برشی منفی در طبقات بالای سازه است.

در سازه‌ی ۶۰ طبقه با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها تا ۳/۲ متر، پتانسیل خرابی پیش‌رونده کاهش یافته است. علت این موضوع توزیع مفاصل خمیری در ارتفاع سازه و عدم وجود تأخیر برشی منفی در سازه است.

سازه‌ی ۶۰ طبقه‌ی لوله در لوله با فاصله‌ی ستون‌های ۳/۲ متر، در مقابل شتاب‌نگاشت با ضریب افزایش ۱/۸ برابر ضریب مقیاس مقاوم است و خرابی پیش‌رونده در آن رخ نمی‌دهد. از آنجا که ۸٪ افزایش شتاب‌نگاشت بسیار غیرمحمتمل است، لذا می‌توان ادعا کرد در این سازه‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ی متعارف آیین‌نامه‌ها، خرابی پیش‌رونده اتفاق نمی‌افتد.

روند تشکیل مفاصل خمیری در طبقات بالایی این سازه‌ها، برخلاف سازه‌های ساختمانی مرسوم، باعث بهبود عملکرد این سازه‌ها در برابر بارهای جانبی و کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده در آنها شده است. به دلیل یکنواخت بودن سیستم سازه‌ی و مسیرهای متنوع انتقال بار به محل فونداسیون سازه، مسیرهای منتخب پس از حذف برخی المان‌ها به خوبی بارهای افزایش‌یافته را در امتداد ارتفاع سازه منتقل می‌کند.

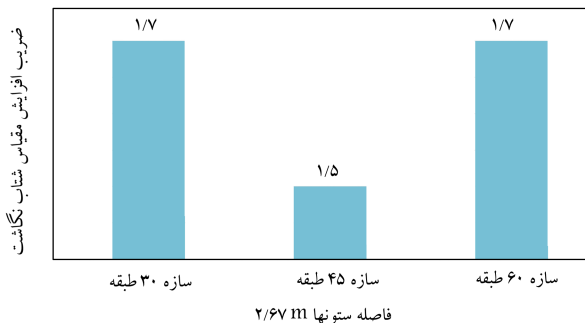
به دلیل اینکه در سازه‌های لوله‌ی مود غالب تغییر شکل برشی است، لذا مفاصل خمیری به جای طبقات اول در طبقات میانی و بالایی شکل گرفته و این مسئله عامل مهمی در مقاومت این سازه‌ها در مقابل بارهای جانبی و خرابی پیش‌رونده است. این پدیده در بسیاری از رفتارهای لرزه‌ی، ناشی از تجمع اثرات انتشار امواج رفت و برگشت زلزله است. براین اساس باید به مفهوم تأثیرگذاری سختی دینامیکی اعضا (تیرها و ستون‌ها) توجه کرد. این سختی دینامیکی ناشی از تیرهای عمیق پیرامونی ایجاد پائل زون‌های برشی است.^[۶]

پانوشته‌ها

1. Ronan Point
2. Caning
3. Alfred P. Murrah
4. world trade center (WTC)
5. national institute of standards and technology

منابع (References)

1. Ministry of Roads and Urban Development, Iran Structure National Institute, 6th Topic, Applied Load on Buildings, Office of Deputy for Housing, Management Office of Structure National Institute (2009).
2. Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization, Instruction for Seismic Rehabilitation of Ex-



شکل ۱۶. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی مدل با فاصله‌ی ستون‌های ۲/۶۷ متر.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی مدل با فاصله‌ی ستون‌های ۳/۲ متر.

۳.۲.۵. سازه‌های با فواصل ستون ۳/۲ متر

در شکل ۱۷، نمودار مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت قابل تحمل در سازه‌های لوله در لوله‌ی فولادی با فواصل ستون ۳/۲ متر و تعداد طبقات متفاوت نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور با افزایش تعداد طبقات، پتانسیل خرابی پیش‌رونده کاهش یافته است.

isting Buildings- No. 360, Management and planning Organization Office of Deputy for Technical affairs (2007).

3. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Seismic Resistant Design of Buildings, Technical Criteria Codification & Earthquake Risk Reduction Affairs Bureau, ISIRI 2800- 3st Revision.
4. Jinkoo, K. and Junhee, P. "Design of steel moment frames considering progressive collapse", *Steel and Composite Structures*, 8(1), pp. 85-98 (2008).
5. Jinkoo, K. and Young-Ho, L., *Progressive Collapse Resisting Capacity of Tube-Type Structures*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, Published Online, Wiley Online Library (25 March 2009).
6. Douglas, A.F. and Seung-Yul, Y. "Modeling of steel moment frames for seismic loads", *Journal of Constructional Steel Research*, 58, pp. 529-564 (2002).