

راهنمای ارزیابی رفتار دینامیکی غیرخطی و شاخص خرابی سازه‌های مجاور تحت اثر ضربه لرزه‌ای با تأکید بر پارامترهای هندسی و جرمی

منیر واثقی^{۱*}، هوشیار ایمانی^۲، الهام قندی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، سازه، دانشگاه محقق اردبیلی h.vaseghi28@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، hek@uma.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، ghandi@uma.ac.ir

خلاصه

وقوع ارتعاشات غیرهم‌فاز در ساختمان‌های مجاور فاقد درز انقطاع کافی، منجر به پدیده ضربه می‌گردد که تهدیدی جدی برای پایداری سازه‌ها در زلزله‌های شدید محسوب می‌شود. در این پژوهش، اثرات متقابل اختلاف ارتفاع، جرم و تراز طبقات بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی به صورت عددی بررسی شده است. مدل‌سازی‌ها شامل جفت‌سازه‌های مجاور (۳، ۶، ۸ و ۱۲ طبقه) در نرم‌افزار SAP2000 بوده که تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی فیزیک برخورد، از المان تماس GAP با رفتار غیرخطی و برای لحاظ نمودن رفتار پسا-تسلیم مصالح، از مفاصل پلاستیک مطابق دستورالعمل FEMA 356 استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که نیروی ضربه باعث جهش ناگهانی در نیروهای برشی طبقات (تا ۸۰ درصد افزایش) و تغییر مکان‌های جانبی (تا ۲۴۰ درصد افزایش در جهت دورشونده) می‌گردد. همچنین، پدیده ضربه میان‌ستون در سازه‌های با تراز ناهمسان، ریسک شکست ترد را به شدت تشدید کرده و شاخص خرابی را به مراتب فراتر از حدود ایمنی جانی می‌برد.

کلمات کلیدی: ضربه سازه‌ای، المان GAP، مفاصل پلاستیک، شاخص خرابی

۱. مقدمه

توسعه روزافزون جوامع شهری و محدودیت زمین، منجر به احداث ساختمان‌های مماس بر هم شده است. در بسیاری از موارد، به دلیل عدم رعایت دقیق ضوابط درز انقطاع، این سازه‌ها در معرض برخورد فیزیکی ناشی از ارتعاشات لرزه‌ای قرار دارند. وقوع زلزله‌های مخرب در دهه‌های اخیر نشان داده است که ضربه لرزه‌ای می‌تواند منجر به فروریزش‌های موضعی یا کلی در بافت‌های متراکم شهری گردد. پدیده ضربه زمانی رخ می‌دهد که فاصله بین دو ساختمان کمتر از مجموع تغییر مکان‌های جانبی آن‌ها باشد. تفاوت در مشخصات دینامیکی مانند سختی، ارتفاع، جرم باعث ایجاد اختلاف فاز در ارتعاش شده و احتمال برخورد را تقویت می‌کند. این پدیده به ویژه در سازه‌هایی با تراز طبقات ناهمسان که منجر به ضربه میان‌ستون می‌شود، تهدیدی جدی برای پایداری ستون‌هاست. تحقیقات نشان می‌دهد که ضربه نه تنها نیروهای داخلی را افزایش می‌دهد، بلکه ماهیت پاسخ‌های سازه‌ای را نیز تغییر می‌دهد. مطالعات کلاسیک در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی عمدتاً بر روی مدل‌های ساده‌سازی شده یک‌درجه آزادی تمرکز داشتند. اگرچه آن تحقیقات دید کلی خوبی ارائه دادند، اما قادر به بازنمایی

رفتار پیچیده مفاصل پلاستیک و توزیع نیروی برشی در ارتفاع ساختمان‌های چندطبقه نبودند. تحقیقات اخیر نشان داده است که اثرات مرتبه دوم و رفتار غیر خطی مصالح در لحظه برخورد، پارامترهای تعیین کننده‌ای هستند که در تحلیل‌های ساده‌سازی شده نادیده گرفته می‌شوند. نوآوری پژوهش حاضر در بررسی همزمان اثر اختلاف تراز طبقات و اختلاف جرم در کنار تنوع ارتفاعی سازه‌هاست. در این راستا، با استفاده از مدل‌های غیرخطی پیشرفته و المان‌های تماس، شاخص خرابی لرزه‌ای بر اساس معیارهای پذیرش FEMA 356 محاسبه شده است تا پاسخی علمی به نیاز طراحان در بهسازی لرزه‌ای بافت‌های متراکم شهری ارائه می‌گردد.

۲. پیشینه پژوهش

ضربه بین سازه‌های مجاور پدیده بسیار پیچیده‌ای است که می‌تواند با تغییر شکل پلاستیک در نقطه تماس، خرابی موضعی و یا خرابی در حد گسیختگی در محل برخورد دو سازه همراه باشد. به همین علت مدل‌سازی ضربه کار دشواری است. از طرف دیگر، تغییر شکل‌های پلاستیک به راحتی در پدیده ضربه قابلیت کاربرد ندارند از این رو به ناچار فرضیات و ایده آل‌سازی‌هایی در مدل‌های تئوریک منظور می‌گردد. به عنوان مثال سازه‌ها به صورت یک نوسانگر یک درجه آزادی یا چند درجه آزادی ایده‌آل سازی می‌شوند و ضربه بین سازه‌ها به صورت یک سیستم فنر میرا کننده خطی و یا غیرخطی مدل می‌گردد. تقریباً اکثر مطالعات انجام شده چنین فرض کرده‌اند که ضربه در ارتفاع دیافراگم طبقه اتفاق می‌افتد و عملاً تمام تحقیقات بر روی تأثیرات ضربه بر پاسخ‌های کلی سازه متمرکز شده‌اند و تأثیرات موضعی نظیر خسارت ستون که توسط دال ساختمان مجاور به آن ضربه وارد شده است کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

آناگنوستوپولوس (۱۹۸۸، ۱۹۹۲) نشان داد که ضربه می‌تواند باعث افزایش شدید شتاب‌های لحظه‌ای در سازه‌ها شود، موضوعی که در طراحی تجهیزات حساس داخل ساختمان بسیار حائز اهمیت است. کاسای و جینگ (۱۹۹۰) با توسعه مدل‌های ریاضی پیچیده‌تر، پدیده ضربه را در ساختمان‌های چند طبقه مورد واکاوی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که برخورد نه تنها بر روی تغییر مکان‌های کلی، بلکه بر روی توزیع نیروهای برشی در طول ارتفاع سازه اثرات غیرخطی و ناگهانی دارد. این مطالعات زیربنای تدوین ضوابط "درز انقطاع" در آیین‌نامه‌های معتبری نظیر ASCE 7 و استاندارد ۲۸۰۰ ایران گردید. وسترمو (۱۹۸۹) حالت اتصال دو ساختمان به یکدیگر برای جلوگیری از ضربه را مطالعه کرد. در این مطالعه ارتعاش ساختمان‌های جدا از هم و در حالت بدون ضربه با حالت ارتعاش دو ساختمان متصل به هم بررسی شده است. میسون و کاسایی (۱۹۹۰)، فرمول بندی و حل معادلات سیستم‌های چند درجه آزادی برای یک نوع از ضربه زدن سازه‌ها را ارائه داده‌اند. ژنگ و همکاران (۲۰۰۰)، آثار ضربه را در ساختمان‌های بلند مورد بررسی قرار داده و تأثیر آن را در نیروی برشی طبقات بیان کرده‌اند. آتناسیادو و همکاران (۱۹۹۴) سازه‌ها را به صورت یک سیستم یک درجه آزادی در یک امتداد با رابطه نیرو تغییر مکان غیر الاستیک مدل کردند. جانکاووسکی (۲۰۰۶) طیف پاسخ نیروی ضربه را برای دو سازه مجاور پیشنهاد داد. این طیف نشان دهنده یک ترسیم از مقادیر بیشینه نیروی ضربه به صورت تابعی از زمان تناوب‌های ارتعاش طبیعی سازه بود. مثال‌های طیف پاسخ نشان داد که پارامترهای سازه ای نظیر فاصله درز انقطاع سازه‌ها، زمان‌های تناوب طبیعی آن‌ها، میرایی، جرم و شکل پذیری همانند تأخیر زمان رکوردهای ورودی زمین لرزه می‌تواند تأثیرات اساسی در مقدار نیروی ضربه داشته باشد.

شبیه‌سازی ضربه بین ساختمان‌های مجاور یکی از چالش‌ها در تحلیل دینامیکی سازه‌های مجاور است که عموماً به سه روش انجام می‌گیرد. روش استریو مکانیک، روش ضرایب لاگرانژ و روش استفاده از المان‌های تماس. مدل‌های استریومکانیک

به دلیل ماهیت صلب خود، در بازنمایی تغییر شکل‌های ماندگار، اتلاف انرژی هیسترتیک و تشکیل مفاصل پلاستیک در لحظه برخورد سازه‌های پیچیده و چنددرجه آزادی ناتوان عمل می‌کند. در مقابل، مدل‌های المان تماس رویکردی منعطف‌تر را ارائه می‌دهند که در پژوهش حاضر نیز مبنای مدل‌سازی قرار گرفته است. در این روش، از فنرهای مجازی برای انتقال نیرو استفاده می‌شود. پژوهش‌های شاخصی نظیر مطالعات لین و ونگ (۲۰۰۱) اثبات کرده‌اند که بهره‌گیری از فنرهای خطی و غیرخطی، به‌ویژه المان‌های GAP، دقت قابل توجهی در تخمین نیروهای داخلی اعضا فراهم می‌آورد. عملکرد این مدل به گونه‌ای است که تا زمان مثبت بودن فاصله جدایی (درز انقطاع)، المان فاقد سختی بوده و به محض رسیدن فاصله به صفر، سختی فنر به صورت خودکار وارد محاسبات ماتریس سختی کل شده و اثر بازدارندگی و انتقال نیرو را اعمال می‌کند. در نهایت، برای رفع نقیصه اتلاف انرژی در مدل‌های فنر ساده، مدل‌های ویسکوالاستیک توسعه یافتند. این مدل‌ها علاوه بر پارامتر سختی، از یک میراگر موازی برای لحاظ کردن استهلاک انرژی در حین برخورد بهره می‌برند. ضرورت این رویکرد در مطالعات جانکووسکی (۲۰۰۵، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸) نشان داده شده است؛ وی با استفاده از این المان طیف‌های نیروی ضربه را برای جرم، زمان تناوب، میرایی و شکل پذیری‌های متفاوت تحت زلزله‌های مختلف به دست آورد. مدل‌های بهبود یافته در این رده، با در نظر گرفتن وابستگی ضریب بازگشت به سرعت نسبی برخورد، رفتار واقع‌گرایانه‌تری از میرایی سازه‌ای را در محیط‌های نرم‌افزاری شبیه‌سازی می‌کنند.

با پیشرفت روش‌های تحلیل لرزه‌ای، استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به استاندارد طلایی پژوهش‌های ضربه تبدیل شد. فاما ۳۵۶ (FEMA 356) و نسخه‌های بعدی آن نظیر ASCE 41، معیارهای پذیرش لرزه‌ای را بر اساس چرخش مفاصل پلاستیک تعریف کردند. مرور منابع نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، تمرکز از بررسی صرف "تغییر مکان" به سمت "شاخص خرابی" معطوف شده است. شاخص خرابی پارک-انگ (Park-Ang) که ترکیبی از تغییر مکان حداکثر و انرژی مستهلک شده سیکلیک است، توسط بسیاری از محققان برای ارزیابی آسیب‌های ناشی از ضربه استفاده شده است. آن‌ها دریافته‌اند که ضربه باعث افزایش تجمع آسیب در المان‌های نزدیک به تراز برخورد می‌شود، حتی اگر تغییر مکان کلی سازه در حد مجاز آیین‌نامه‌ای باقی بماند (آناگنوستوپولوس ۲۰۰۵، ۲۰۰۸).

مطالعات بر روی اثر جرم و کاربری تفاوت در کاربری ساختمان‌ها (مثلاً یک ساختمان اداری سبک در کنار یک انبار سنگین) منجر به اختلاف جرم قابل توجه می‌شود. مطالعات پانتلیدس و مایسون (۱۹۹۸) نشان داد که ساختمان سبک‌تر در برخورد با ساختمان سنگین‌تر، شتاب‌های فوق‌العاده بالایی را تجربه می‌کند که می‌تواند منجر به فروریزش اجزای غیرسازه‌ای و سقف‌ها شود. این پارامتر در پژوهش حاضر به عنوان یک متغیر کلیدی در مدل‌های MDOF مورد واکاوی قرار گرفته است.

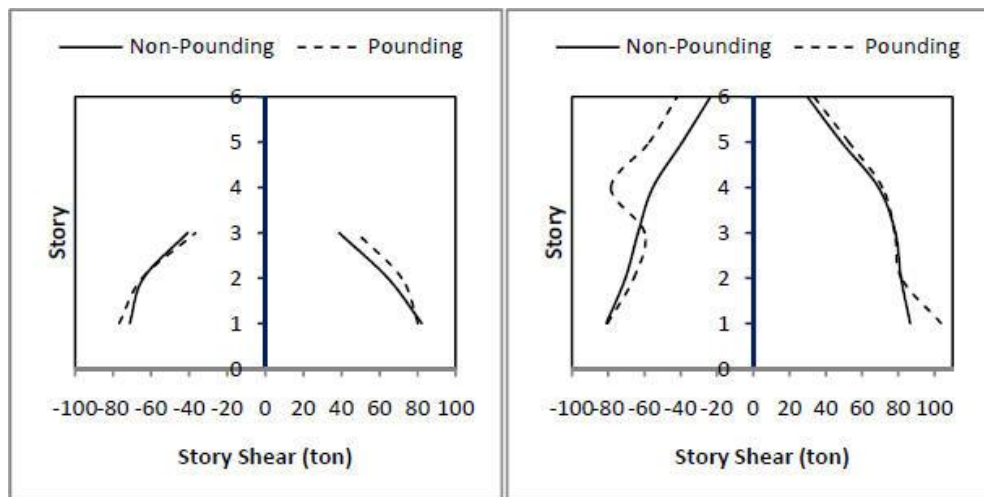
۳. روش تحقیق و مدل‌سازی

در این مطالعه، جفت‌سازه‌های مجاور با تعداد طبقات ۳، ۶، ۸ و ۱۲ طبقه انتخاب شده‌اند. سیستم باربر جانبی تمامی مدل‌ها، قاب خمشی فولادی متوسط طراحی شده بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ ایران است. ترکیبات مورد بررسی شامل (۳-۶)، (۳-۸)، (۶-۸)، (۶-۱۲) و (۸-۱۲) طبقه می‌باشد. برای شبیه‌سازی برخورد در نرم‌افزار SAP2000، از المان‌های Link نوع GAP استفاده شده است. مشخصات این المان‌ها به گونه‌ای تنظیم شده که تنها در حالت فشاری فعال شوند (وقتی فاصله بین دو سازه به صفر برسد). سختی این فنرها بر اساس سختی محوری دیافراگم ساختمان مجاور محاسبه شده تا واقع‌گرایی فیزیکی حفظ شود.

رفتار غیرخطی مصالح از طریق اختصاص مفاصل پلاستیک به دو انتهای تیرها و ستون‌ها لحاظ شده است. مشخصات گشتاور-دوران این مفاصل مطابق با جداول استاندارد FEMA 356 تعریف گردید. مدل‌ها تحت سه شتاب‌نگاشت منتخب (چی چی تایوان، لوماپریتا و نورتریج) که بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس شده‌اند، مورد تحلیل قرار گرفتند.

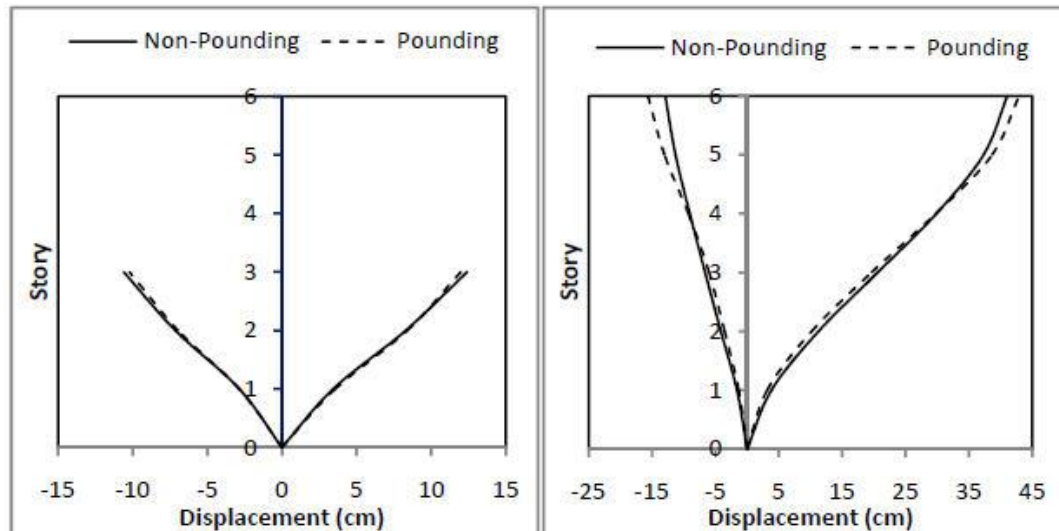
۴. یافته‌های پژوهش

در تمامی مدل‌ها، نیروی ضربه باعث جهش ناگهانی در نیروی برشی طبقات زیرین تراز برخورد شده است. به عنوان مثال، در ساختمان ۶ طبقه مجاور ساختمان ۳ طبقه تحت زلزله لوماپریتا، نیروی برشی طبقات تا حد زیادی افزایش یافته و شرایط را نسبت به حالت بدون ضربه بحرانی‌تر کرده است.



شکل ۱. نمودار حداکثر نیروی برشی طبقات ساختمان ۳ و ۶ طبقه در اثر ضربه تحت زلزله لوماپریتا

تغییر مکان جانبی نیز در جهت دورشونده (مثبت) افزایش چشمگیری نشان می‌دهد که ناشی از انتقال ممتمم برخورد است. ضربه باعث شده است که مفاصل پلاستیک در ترازهای برخورد سریع‌تر از حالت عادی تشکیل شوند.



شکل ۲. نمودار حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات ساختمان ۳ و ۶ طبقه در اثر ضربه تحت زلزله لوماپریتا

برای محاسبه شاخص خرابی در ترازهای بحرانی (تراز پایه، تراز برخورد و تراز بام ساختمان بلند) نیاز به تعیین نسبت حداکثر تغییر مکان نسبی و حداکثر نیروی برش این ترازها در حالت ضربه نسبت به حالت بدون ضربه می باشد؛ لذا با استفاده از نتایج پاسخ حداکثر تغییر مکان و نیروی برشی طبقات نسبت به محاسبه α_1 و α_2 و نهایتاً محاسبه α در مدل ضربه ساختمان ۳ و ۶ طبقه اقدام شد. سپس شاخص خرابی هر یک از ترازهای بحرانی فوق برای هر دو ساختمان ۳ و ۶ طبقه در این ترازها محاسبه و سطح خطر برخورد لرزه ای هر یک تعیین گردید. با توجه به اینکه نتایج پاسخ مدل ضربه ساختمان های ۳ و ۶ طبقه تحت زلزله چی چی تایوان نسبت به دو زلزله دیگر مقادیر بیشتری دارد بنابراین محاسبات مربوطه صرفاً برای نتایج این زمین لرزه انجام و نتیجه ارائه شده است.

جدول ۱. دسته بندی شاخص خرابی برای هر تراز

فروریزی	$DI > 3.1$
صدمات شدید	$3.1 > DI > 2.4$
صدمات متوسط	$2.4 > DI > 1.9$
صدمات کم	$1.9 > DI > 1.4$
عدم ضربه	$1.4 > DI > 0$

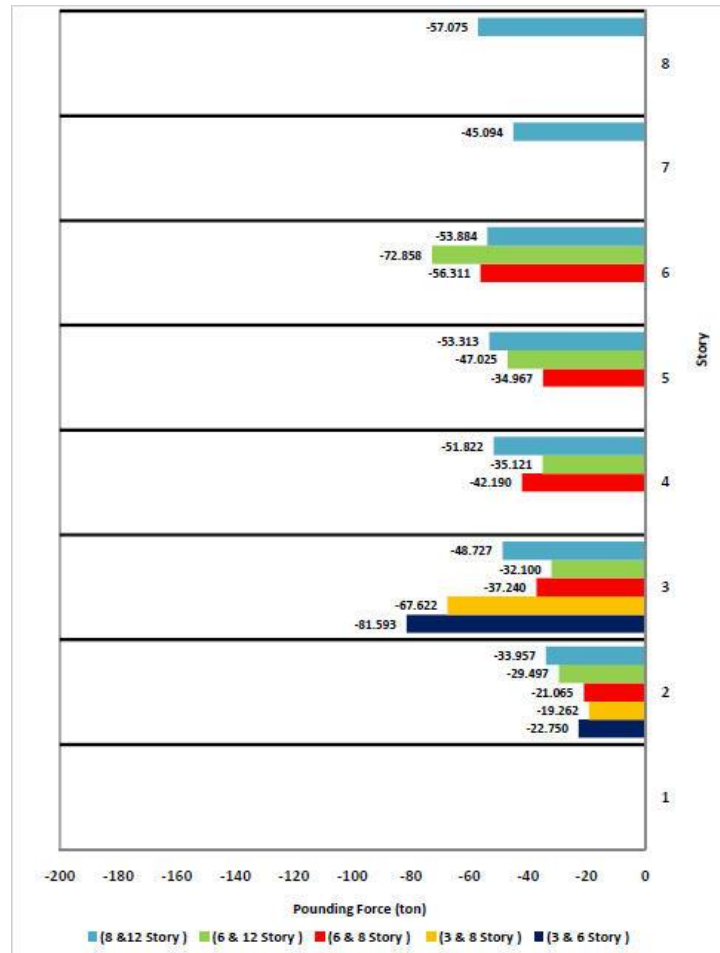
شاخص مذکور، تنها بیانگر احتمال خرابی های ناشی از برخورد لرزه ای است و به سایر خرابی های لرزه ای وابسته نمی باشد. ترازهای تعریف شده بر اساس مشاهدات زلزله های گذشته و تجربه تایوان تعیین و اصلاح شده اند.

جدول ۲. شاخص خرابی و سطح خطر برخورد لرزه ای ترازهای بحرانی در ساختمان های ۳ و ۶ طبقه تحت زلزله چی چی تایوان

مؤلفه	تراز پایه		تراز برخورد (تراز بام ساختمان کوتاه)				تراز بام (ساختمان بلند)	
	۳ طبقه		۶ طبقه				۶ طبقه	
	حالت بدون ضربه	حالت ضربه	حالت بدون ضربه	حالت ضربه	حالت بدون ضربه	حالت ضربه	حالت بدون ضربه	حالت ضربه
قدر مطلق حداکثر تغییر مکان نسبی طبقه	0.0142	0.0105	0.0082	0.0098	0.0131	0.0106	0.0180	0.0201
قدر مطلق حداکثر برش طبقه (ton)	85.414	81.820	92.260	95.871	38.205	52.554	65.655	72.685
α_1	0.739	1.201	0.810	1.114	1.207	1.224	1.107	1.571
α_2	0.958	1.039	1.376	1.596	1.719	1.719	1.571	1.571
α	1.210	1.588	2.064	2.075	2.235	2.235	2.042	2.042
شاخص خرابی (DI)	1.572	2.064	2.075	2.042	2.235	2.235	2.042	2.042
سطح خطر برخورد لرزه ای	C	B	C	C	D	D	C	C

گروه A: ساختمان بسیار خطرناک و در آستانه فروریزش از ناحیه ضربه لرزه ای / گروه B: ساختمان خطرناک / گروه C: ساختمان در معرض خطر / گروه D: ساختمان مشکوک به آسیب های پراکنده / گروه E: ساختمان ایمن

برای بررسی اثر ارتفاع بر مقدار نیروی ضربه المان GAP در مدل های ضربه ساختمان های مجاور (ساختمان های ۳ و ۶، ۳ و ۸، ۶ و ۸، ۱۲ و ۸ و ۱۲ طبقه) مقادیر حداکثر این نیرو در تراز برخورد طبقات تحت زلزله نورتریج در یک نمودار میله ای ترسیم شده است. محور افقی این نمودار مقدار نیروی ضربه بر حسب تن و محور قائم تراز طبقات (تراز برخورد) است و مقادیر نیروی ضربه در تراز هر طبقه برای هر مدل به صورت یک نمودار میله ای ترسیم شده است.



شکل ۳. نمودار میله ای مقادیر حداکثر نیروی ضربه (نیروی المان GAP) در ترازهای برخورد تمامی مدل ها تحت زلزله نورتریج

۵. نتیجه گیری

بررسی مقادیر حداکثر نیروی ضربه در هر سه زلزله حاکی از آن است که در تمامی مدل‌ها، حداکثر نیروی ضربه از پایین‌ترین تراز به سمت بالاترین تراز برخورد، از یک روند افزایشی تبعیت می‌کند و بیشترین نیروی ضربه در بالاترین تراز برخورد (تراز بام ساختمان کوتاه تر) رخ می‌دهد. پاسخ‌های حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات در ساختمان بلند تحت اثر ضربه عمدتاً در جهت مثبت (جهت دور شدن از سازه کوتاه تر) در کل ارتفاع افزایش یافته و در طبقات بالای آخرین تراز برخورد این افزایش چشمگیرتر است و در جهت منفی (جهت ضربه یا جهت نزدیک شدن به سازه کوتاه تر) عمدتاً کاهش پاسخ را مشاهده می‌کنیم. پاسخ‌های حداکثر نیروی برش طبقات در ساختمان بلند تحت اثر ضربه در جهت مثبت (جهت دور شدن از سازه کوتاه تر) در کل ارتفاع افزایش یافته است و در جهت منفی (جهت ضربه یا جهت نزدیک شدن به سازه کوتاه تر) عمدتاً در طبقات پایین تر از آخرین تراز برخورد کاهش در پاسخ و در طبقات بالای آن (مخصوصاً اولین طبقه بالای آخرین تراز برخورد) افزایش چشمگیری در نیروی برش طبقه را نسبت به حالت بدون ضربه شاهد هستیم. مقایسه وضعیت مفاصل پلاستیک اختصاص یافته به اعضا در حالت بدون ضربه با وضعیت مفاصل پلاستیک بعد از ضربه، نشان می‌دهد که از یکسو، پدیده ضربه در وارد

شدن تغییر شکل‌ها از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک نقش بسزایی دارد که نتیجه آن، تشکیل مفاصل پلاستیک جدید در اعضای سازه‌ای می‌باشد و از سوی دیگر، پدیده ضربه تغییر شکل‌های پلاستیک مربوط به حالت بدون ضربه را نیز افزایش می‌دهد که نتیجه آن کاهش سطح عملکرد است.

پدیده ضربه به طور کلی پاسخ‌های لرزه‌ای را بین ۲۰ تا ۸۰ درصد در ترازهای بحرانی تشدید می‌کند. حداکثر نیروی ضربه در المان‌های GAP همواره در بالاترین نقطه برخورد (سقف سازه کوتاه‌تر) رخ می‌دهد. تفاوت در جرم و کاربری ساختمان‌ها (نظیر پارکینگ یا انبار) شدت آسیب‌های لرزه‌ای را افزایش می‌دهد.

مراجع

۱. منیر واثقی دودران (۱۳۹۳)، "اثر ضربه ساختمانهای مجاور در هنگام بارهای لرزه‌ای"، پایان‌نامه ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی
۲. استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم آئین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی.
۳. مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بارهای وارد بر ساختمان، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.
4. American Society of Civil Engineers for Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures 2010. ASCE/SEI 7-10. USA.
5. Jankowski, R. 2005. Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structural pounding. Earthquake Eng. Struc. Dynam. 34: 595-611.
6. Jankowski, R. 2004. Non-linear viscoelastic model of structural pounding. Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
7. Jankowski, R. 2006. Pounding force response spectrum under earthquake excitation. Eng, Struc. 28: 1149-1161.
8. Jankowski, R. 2008. Earthquake-induced pounding between equal heights buildings with substantially Different dynamic properties. Eng. Struc. 30:2818-2829.
9. Lin, J. H., & Weng, C. C. (2001). "Probability analysis of seismic pounding of adjacent buildings." Journal of Structural Engineering.
10. Pantelides, C. P., & Maison, B. F. (1998). "Structural pounding of adjacent buildings in earthquakes." Journal of Structural Engineering.
11. FEMA 356 (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings." Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
12. Anagnostopoulos, A. 1988. Pounding of buildings in series during earthquakes". Earthquake Eng. Struc. Dynam. 16: 443-456.
13. Anagnostopoulos, A. 2005. Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake Pounding problems. Earthquake Eng, Struc, Dynam. 33: 897-902.
14. Anagnostopoulos, A., Karamaneas, C. 2008. Use of collision shear walls to minimize seismic separation And to protect adjacent buildings from collapse due to earthquake-induced pounding. Earthquake Eng. Struc. Dynam. 37: 1371-1388.
15. Anagnostopoulos, A. 1996. Building pounding Re-Examined: How Serious a problem is it? 11th world conf On Earthquake Eng. paper no. 2108. 131-144.

16. Anagnostopoulos, A., Spiliopoulos, KV. 1992. An investigation of earthquake induced pounding between Adjacent buildings. Earthquake Engineering and Structural dynamics. 21: 289-302.
17. Kasai, K., & Jeng, V. (1990). "A study on relative displacement of adjacent structures." Proceedings of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
18. Maison, B. F., & Kasai, K. (1992). "Dynamics of pounding when two buildings collide." Earthquake Engineering & Structural Dynamics.
19. Jeng, V. Kasai, K. 1994. Spectral Relative Motion of Two Structures Due to Siesmic Travel Wave. Struct, Eng, ASCE. 122:1128 1135.
20. Athanassiadou, CJ. Penelis, GG. Kappos, AJ. 1994. Seismic Response of Adjacent buildings with Similar or different dynamic characteristics. Earthquake Spectra. 10(2): 293-317.
21. Federal Emergency Management Agency, FEMA 273. 1997. NEHRP Guidelines for the seismic Rehabilitation of buildings. Washington D.C., USA.