

بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک تحت اثر مؤلفه‌های قائم و افقی زلزله

مجید قلهکی* (استادیار)

محمدجواد ستاری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (دوره ۲ - شماره ۴، ص. ۱۳۳-۱۴۵، یادداشت فنی)

فلسفه‌ی طراحی لرزه‌ی موجود در آیین‌نامه‌ها، تعیین تنش‌های حاصل در اعضاء ناشی از اعمال شتاب افقی حرکت زمین بدون در نظر گرفتن اثرات مؤلفه‌ی قائم را توصیه می‌کند. در عین حال، شکل آسیب‌های سازه‌ی گزارش شده‌ی ناشی از زمین‌لرزه در محدوده‌ی نزدیک گسل به گونه‌ی است که متخصصان، مؤلفه‌ی قائم زلزله را در ایجاد چنین خرابی‌هایی دخیل می‌دانند. از طرفی تاکنون رفتار دیوار برشی فولادی با ورق نازک تحت مؤلفه‌ی قائم زلزله بررسی نشده است. بر این اساس در این نوشتار رفتار غیرخطی مدل‌های دیوارهای برشی ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه، تحت چندین نگاشت مؤلفه‌ی افقی و قائم مختلف مورد مطالعه و روند تشکیل مفاصل خمیری و همچنین مودهای مختلف شکست مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از رفتار مناسب این سیستم تحت مؤلفه‌ی قائم و حتی هم‌زمان با حضور مؤلفه‌ی افقی زلزله است.

واژگان کلیدی: مؤلفه‌ی قائم زلزله، دیوار برشی فولادی با ورق نازک، مفاصل خمیری، مودهای خرابی (شکست).

mgholhaki@semnan.ac.ir
mjs683@gmail.com

۱. مقدمه

در حالت کلی زمین‌لرزه را می‌توان بر اساس ۶ مؤلفه‌ی حرکت زمین در نظر گرفت. این مؤلفه‌ها شامل ۳ مؤلفه‌ی انتقالی و ۳ مؤلفه‌ی دورانی هستند. حرکت زمین در هنگام زلزله معمولاً بر حسب ۳ مؤلفه‌ی انتقالی بیان می‌شود، که از ۳ مؤلفه‌ی انتقالی زلزله، ۲ مؤلفه‌ی افقی متعامد و ۱ مؤلفه‌ی قائم تشکیل شده است. مطالعه‌ی حرکات زمین در طی زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که میزان مؤلفه‌ی قائم شتاب زمین در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک قابل توجه و حتی در برخی از موارد از مؤلفه‌های افقی بیشتر است.^[۱] لذا پژوهش‌های زیادی به منظور بررسی اثر مؤلفه‌ی قائم شتاب زلزله در رفتار سازه‌ها صورت پذیرفته است و به ویژه پس از زلزله‌های نورث‌ریج (۱۷ ژانویه ۱۹۹۴) و کوبه (۱۷ ژانویه ۱۹۹۵) این مسئله مورد توجه بیشتر پژوهشگران قرار گرفته است و آیین‌نامه‌های مختلف، درصدد لحاظ کردن این موضوع مهم در توصیه‌های طراحی خود برآمده‌اند.^[۲]

یکی از اولین پژوهش‌ها در این زمینه در سال ۱۹۷۲ صورت گرفته است، که در آن یک تیر طره برای بررسی اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله به صورت ساده‌ی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.^[۳]

در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۷، پاسخ لرزه‌ی ۳ نمونه‌ی ساختمان ۳، ۵ و ۱۵ طبقه تحت ۱۳ رکورد زلزله با در نظر گرفتن مؤلفه‌ی قائم در آیین‌نامه‌های نرپ و مکزیک مورد بررسی قرار گرفته و به این نتیجه رسیده‌اند که احتمال افزایش نیروی محوری در ستون‌ها وجود دارد.^[۴]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۰/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۱۱، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۵.

همچنین پژوهشگرانی در سال ۲۰۰۰، با انتخاب یک مدل دو بعدی پتبی، اثرات مؤلفه‌ی قائم زلزله در رفتار این قاب و پارامترهای مختلفی از قبیل: تغییرمکان سقف، نیروی محوری ستون‌ها و میزان جذب انرژی ستون‌ها را مورد بررسی قرار دادند.^[۵] همچنین در این سال در مطالعه‌ی دیگری به بررسی پاسخ قاب‌های بتن‌آرمه تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک با تأکید بر مؤلفه‌ی قائم نیروی زلزله و تأثیر آن در پاسخ غیرخطی قاب‌های دو بعدی پرداخته شد.^[۶] و نیز با تحلیل دینامیکی چند مدل سه بعدی بتن‌آرمه، به بررسی روند پاسخ‌های سازه‌ی و عملکرد آنها تحت مؤلفه‌ی قائم زلزله و نیز مقایسه‌ی اثرات تحریک زلزله به صورت ۲ مؤلفه‌ی و ۳ مؤلفه‌ی (۲ مؤلفه‌ی افقی و ۱ مؤلفه‌ی قائم) پرداخته شده و اثر پارامترهای مختلفی از جمله طول دهانه (با تأکید بر روی دهانه‌های بزرگ)، تعداد طبقات و خروج از مرکزیت‌های مختلف در ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفته است.^[۷]

در سال ۲۰۰۴ نیز اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله در ساختمان‌های فولادی ۴ و ۵ طبقه با سیستم باربر جانبی بادیبند توسط نرم‌افزار دینامیکی غیرخطی Drain-۳D مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج عددی آن نشان‌دهنده‌ی تأثیر قابل توجه مؤلفه‌ی قائم بر ستون‌های سازه‌های مهاربندی شده بود. البته همان‌طور که انتظار می‌رفت، این تأثیر نسبت به ستون‌های قاب‌های خمشی کمتر بود.^[۸]

پژوهشگر دیگری در نوشتار خود (۱۹۸۷) با نام «مطالعه‌ی حرکت قائم زمین در تحلیل دینامیکی ساختمان» با بررسی خسارات زلزله‌های گذشته عنوان کرده است که ستون‌های کناری ساختمان نسبت به دیگر ستون‌ها مستعد خرابی بیشتریند و علل

آن احتمالاً مؤلفه‌ای قائم زلزله است، و با مطالعات عددی انجام شده نتیجه‌گیری کرده است که مؤلفه‌های افقی زلزله، نیروی محوری زیادی در این ستون‌ها ایجاد می‌کنند. همچنین مؤلفه‌ای قائم زلزله، علاوه بر افزایش نیروی محوری ستون‌های کناری باعث تشدید لنگرهای تیرها می‌شود، که این تیرها، لنگرها را به ستون‌های کناری منتقل می‌کنند و اثر توأم نیروی محوری و لنگر خمشی در دو جهت ستون، باعث خرابی آن می‌شود. علاوه بر این تأکید کرده است که اثر مؤلفه‌ای قائم زلزله در تحلیل غیرخطی باید برای کلیه ستون‌ها در نظر گرفته شود.^[۹]

در نوشتار دیگری (۱۹۹۱) با عنوان «رفتار دینامیکی پل بزرگراه‌ها بر اثر مؤلفه‌ی توأم افقی و قائم زلزله»، رفتار پل‌های بزرگراه‌ها در دو حالت تحلیل خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه‌گیری شده است که: شتاب مؤلفه‌ی قائم زلزله می‌تواند به مؤلفه‌ی افقی و حتی بزرگ‌تر از آن برسد. و با انجام تحلیل خطی بر روی پل‌ها، مؤلفه‌ی قائم زلزله، نیروی برشی و لنگر خمشی تیرها و نیز نیروی محوری ستون‌ها افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. همچنین با انجام تحلیل غیرخطی بر روی پل‌ها، مؤلفه‌ی قائم زلزله باعث ناپایداری حلقه‌های هیستریزس نیروی محوری ستون‌ها و افزایش تغییرشکل محوری آنها می‌شود، و مؤلفه‌ی قائم زلزله، نیروهای برشی بزرگی در تکیه‌گاه‌ها و نیروی فشاری زیادی در پی‌ها ایجاد می‌کند، که در آیین‌نامه‌های رایج پل‌سازی بدان اشاره نشده است. لذا، باید در طراحی پل بزرگراه‌ها، مخصوصاً پل‌هایی که در مناطق زلزله‌خیز قرار دارد، اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله در نظر گرفته شود.^[۱۰]

پژوهشگری در پایان‌نامه‌ی کارشناسی خود (۱۹۹۶) به بررسی اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله بر پل‌ها پرداخته است، که در آن با در نظر گرفتن ۲/۳ مؤلفه‌ی افقی زلزله به جای مؤلفه‌ی قائم زلزله، پل‌ها را تحت ۲ زلزله‌ی ناغان و طیس مورد تحلیل قرار داده و نتیجه‌گیری کرده است که با در نظر گرفتن مؤلفه‌ی قائم زلزله، نیروهای برشی و لنگر خمشی تیرها و همچنین نیروی محوری ستون‌ها و پی‌ها در حدود ۳۰ الی ۶۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.^[۱۱]

همچنین پژوهشگر دیگری در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود (۱۹۹۷) با موضوع «بررسی اثرات مؤلفه‌ی قائم زلزله در پاسخ قاب‌های ساختمانی»، ساختمان‌های متعددی را با توجه به ضوابط آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران بارگذاری و طراحی و سپس با ۵ رکورد زلزله از مناطق مختلف ایران بررسی و نتیجه‌گیری کرده است که با در نظر گرفتن جرم ساختمان به صورت گسترده بر روی تیرها، دوره‌ی تناوب مود اول ارتعاش در جهت قائم، نزدیک محدوده‌ی دوره‌ی تناوب غالب رکوردهای زلزله در جهت قائم می‌شود، که این موضوع باعث تشدید نیروهای ایجاد شده بر اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله می‌شود. از این رو هر چند مؤلفه‌ی قائم زلزله کوچک باشد، نیروهای ایجاد شده بر اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله، قابل ملاحظه خواهد بود. و همچنین در طراحی ستون‌های میانی و تیرهای سقف ساختمان‌های با مصالح بنایی، اگر نسبت شتاب مؤلفه‌ی قائم به افقی زلزله بزرگ‌تر از ۰/۳ باشد، اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله قابل ملاحظه است و پیشنهاد می‌شود طی دستورالعمل خاصی موضوع در آیین‌نامه‌های محاسبات ساختمان در مقابل زلزله مد نظر قرار گیرد. و نیز در طراحی ستون‌های کناری و تیرهای طبقات بالایی ساختمان، اگر نسبت شتاب مؤلفه‌ی قائم به افقی زلزله بزرگ‌تر از ۰/۶ باشد، اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله اهمیت خاصی می‌یابد، که باید در نظر گرفته شود.^[۱۲]

در نوشتار دیگری در سال ۲۰۰۴، میزان آسیب‌پذیری تیرها در برابر اثرات مؤلفه‌ی قائم زمین‌لرزه با استفاده از تحلیل تاریخی زمانی و تحت ۳ دسته شتاب‌نگاشت سه مؤلفه‌ی مربوط به محدوده‌ی نزدیک به گسل در زلزله‌های طیس، نورث‌ریج و کوبه برای مجموعه‌ی از سازه‌های متداول ساختمانی و غیرساختمانی (سوله،

قاب مهاربندی فولادی، قاب خمشی بتنی، قاب خمشی فولادی) و تحت نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت، و نتایج آن نشان داد که تغییرات لنگر خمشی میانه‌ی دهانه‌ی تیر در کلیه‌ی سازه‌ها اعم از قاب‌های خمشی (به واسطه‌ی تشکیل نقطه‌ی عطف در این مقطع) و یا قاب‌های با سیستم سختی جانبی مهاربندی یا دیوار برشی (به دلیل مشارکت نداشتن تیرها در سختی جانبی سازه)، کاملاً متأثر از شتاب قائم حرکت زمین است. بدین معنی که در این‌گونه سازه‌ها، ارتعاش افقی سازه با تشکیل نقطه‌ی عطف در حوالی مقطع میانی تیر همراه می‌شود و هیچ‌گونه لنگر خمشی در این محل ایجاد نمی‌شود. از طرف دیگر، مود شکل اول ارتعاش قائم تیرها به عنوان مود غالب در تعیین نیروهای حاصل از شتاب قائم، به وقوع بیشینه‌ی لنگر خمشی در میانه‌ی تیرها می‌انجامد.^[۱۳]

از طرفی در طی ۴ دهه‌ی گذشته، از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بار جانبی که عملکرد لرزه‌ی مناسبی دارد، در طراحی و تقویت بعضی از ساختمان‌ها استفاده شده است. از مزایای استفاده‌ی این سیستم نسبت به مشابه بتنی آن می‌توان به مواردی همچون کاهش وزن مرده‌ی ساختمان و در نتیجه کاهش لنگر خمشی و نیروی زلزله‌ی وارد بر آن، افزایش سختی جانبی و در نتیجه کاهش جابجائی بالای آن، کاهش ابعاد تیر و ستون‌ها و در نتیجه افزایش فضای مفید طبقات و همچنین اجرای سریع و آسان آن اشاره کرد. رفتار مناسب سیستم در جذب انرژی، پایداری حلقه‌ی هیستریزس و همچنین سختی، مقاومت و شکل‌پذیری بالای آن، ایده‌ی استفاده از این سیستم مقاوم در ساختمان‌ها را بیش از پیش تقویت می‌کند.^[۱۴]

در این زمینه، مطالعات متعدد آزمایشگاهی و تحلیلی توسط پژوهشگران مختلف در کشورهایی همچون ایران، کانادا، آمریکا، ژاپن، انگلیس و تایوان انجام شده و یا در حال انجام است. در زمینه‌ی دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده می‌توان به مطالعاتی همچون ارائه‌ی روابط پس از کمایش ورق توسط ترورن (۱۹۸۳)،^[۱۵] انجام آزمایش دیوار برشی ۴ طبقه (۱۹۸۳)،^[۱۶] اثر نوع اتصال تیر و ستون در رفتار دیوار برشی فولادی (۱۹۹۳)،^[۱۷] بررسی رفتار دینامیکی دیوار برشی فولادی (۱۹۹۱)،^[۱۸] و اثر بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی (۱۹۹۲)،^[۱۹] و رفتار برشی دیوارهای برشی فولادی با ورق نرم (۲۰۰۳)،^[۲۰] اشاره کرد.

وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در نزدیک شهرهایی که در مجاورت گسل‌ها قرار گرفته‌اند، غیرقابل انکار است. چنانچه این زمین‌لرزه‌ها تحت اثرات پیش‌رونده قرار گیرند، در تاریخی زمانی جابجائی، سرعت و شتاب آنها پالس‌های مشخصی دیده می‌شود، که سازه را تحت تأثیر شدید و سریع قرار می‌دهد.

پژوهش‌های جدید نشان می‌دهد که اثر زلزله‌های نزدیک گسل بر روی ساختمان‌ها با اثر زلزله‌های دور از گسل متفاوت است. نگاشت‌های نزدیک گسل دارای مدت زمان مؤثر کمتری نسبت به نگاشت‌های دور از گسل است و در نگاشت‌های سرعت نزدیک گسل، یک یا چند پالس ضربه‌ی با دامنه‌ی بزرگ و دوره‌ی تناوب زیاد وجود دارد که ناشی از اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده‌ی شکست است. این پالس‌ها در مؤلفه‌ی افقی عمود بر گسل دیده می‌شوند. حرکت پالس‌گونه باعث اعمال انرژی حجیم (در مدت زمان کوتاه) و ضربه‌گونه‌ی زلزله‌های نزدیک گسل بر روی سازه می‌شود و این مسئله باعث ایجاد دوران زیاد در بعضی طبقات و اتصالات و گسیختگی ترد اتصالات می‌شود و ایجاد طبقه‌ی نرم و تخریب آنی سازه را در بر دارد. علاوه بر این زلزله‌های نزدیک گسل تغییر مکان‌های نسبی بزرگ‌تری در سازه ایجاد می‌کند و تمرکز تغییرشکل‌ها در طبقات پایین باعث افزایش اثر پی - دلتا در آن می‌شود.

جدول ۱. خصوصیات مکانیکی اجزاء نمونه‌ی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی.

اعضاء	تنش تسلیم (N/mm ²)	تنش نهایی (N/mm ²)	مدول کشسانی (kN/mm ²)
ورق	۱۸۰	۳۰۰	۲۰۶
تیرهای میانی	۳۱۰	۴۴۶	۲۰۶
ستون و تیر فوقانی	۳۶۶	۵۵۰	۲۰۶

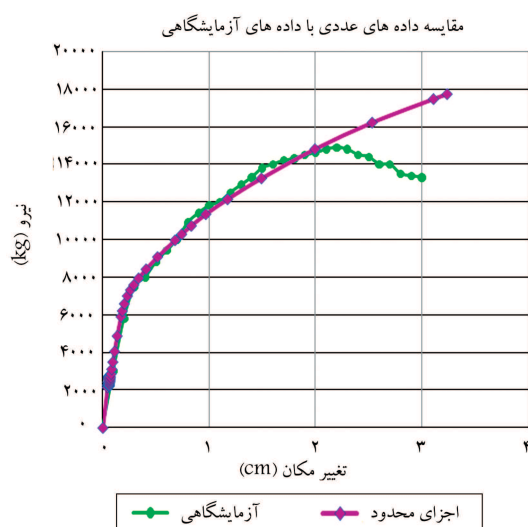
۳. مدل سازی در نرم افزار و کالیبره کردن مدل

به دلیل بخ دادن کماتش های متعدد و وارد کردن ورق به ناحیه ی پس کمانش، تحلیل های رایانه یی دیوارهای برشی فولادی مشکلات زیادی داشته است و نوع تئوری تغییرشکل های بزرگ به کار رفته و نوع آنالیز می تواند تأثیر زیادی در نتایج داشته باشد. در ورق های نازک به علت کماتش های متعدد در نواحی مختلف، هم گرایی عددی به سختی صورت پذیرفته است، لذا مش بندی ریز برای ورق لازم است که ابعاد المان ها پس از انجام آنالیز حساسیت به ابعاد ۵۰ میلی متر انتخاب شد، که این مسئله باعث کند شدن آنالیزها می شود. از طرف دیگر، چون تغییرات تنش زیاد است؛ لذا، باید از المان هایی استفاده شود که قابلیت این مسئله را داشته باشد و به همین جهت از المان های Shell S4R در مدل سازی ها استفاده شده است.

همچنین هر دو نوع غیرخطی شدن مصالح و هندسی در آنالیزها لحاظ شده است. برای سادگی، از مدل با حالت خمیری دو طی با سخت شوندگی سینماتیکی و تابع تسلیم فون میسر استفاده شده است. شیب قسمت سخت شونده ی نمودار تنش - کرنش برابر ۵٪ قسمت کشسان در نظر گرفته شده است.

در نرم افزارهای اجزاء محدود چنانچه فرض ناصافی اولیه در مرکز ورق ها در نظر گرفته نشود، صفحه ی تحت بار داخل صفحه دچار کمانش نمی شود و بدین ترتیب سختی و بار تسلیم دیوار بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می شود. بر این اساس در این تحلیل ها، ابتدا آنالیز حساسیت میزان اعوجاج اولیه بر روی ورق ها انجام و در نهایت ۳ میلی متر اعوجاج اولیه به وسط ورق ها اعمال شده است.

به منظور کالیبره کردن مدل، آنالیز استاتیکی غیرخطی با اعمال تغییر مکان افزایشده به نقاط انتهایی تیر طبقه ی سوم انجام شده است. در شکل ۲، منحنی به دست آمده از



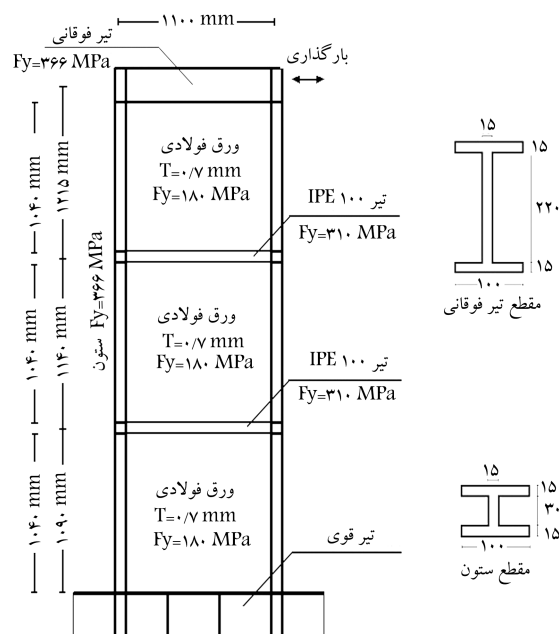
شکل ۲. مقایسه ی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی.

بر این اساس و با توجه به اینکه تاکنون رفتار این سیستم سازه یی تحت مؤلفه ی قائم زلزله مورد بررسی قرار نگرفته است، در این نوشتار به منظور بررسی اثر مؤلفه ی قائم و نیز اثر توأم مؤلفه ی قائم و افقی، مدل آزمایشگاهی قلهکی^[۲۱] که دیوار برشی فولادی شکل پذیر ۳ طبقه دارای ورق نازک با مقیاس یک سوم است، به همراه مدل های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه در نرم افزار اجزاء محدود Abaqus مدل شده است و تحت چندین شتاب نگاشت مؤلفه ی افقی و قائم مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته و روند تشکیل مفاصل خمیری و نیز مودهای مختلف شکست در آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲. مشخصات مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

در این مطالعه، دیوار برشی فولادی شکل پذیر ۳ طبقه دارای ورق نازک با مقیاس یک سوم که تحت بارگذاری چرخه یی توسط قلهکی (۲۰۰۷) مورد آزمایش قرار گرفته استفاده شده است. دیوار مذکور دارای اتصال تیر به ستون صلب است و در ورق پانل ها و ستون ها به ترتیب فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) و پرمقاومت به کار گرفته شده است.^[۲۱]

در آزمایش مذکور، قبل از خرابی نمونه و پایان آن، تغییرمکان طبقه ی اول به ۱۰ برابر تغییرمکان اولین تسلیم شدگی آن رسید. نمونه، شکل پذیری عالی، سختی اولیه ی زیاد و جذب انرژی بالایی داشت و حلقه های هیستریزس آن رفتار پایداری را نشان دادند. استفاده از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) در ورق پانل ها باعث جذب انرژی فوق العاده یی در تغییرمکان های بزرگ شد. علاوه بر این، در خلال آزمایش ها و تا پایان آنها، هیچ گونه علامتی از کماتش موضعی یا کلی در ستون ها دیده نشد. شکل ۱، نمای کلی دیوار برشی فولادی مذکور، ابعاد و مقاطع تیرها و ستون ها را نشان می دهد و در جدول ۱ خصوصیات مکانیکی اجزاء مورد استفاده در آن آورده شده است.^[۲۱]



شکل ۱. نمای کلی و جزئیات نمونه ی دیوار برشی فولادی آزمایشگاهی.

آنالیز اجزاء محدود با پوش منحنی چرخه‌یی آزمایشگاهی مدل ۳ طبقه مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودارهای به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی در سختی اولیه و بار تسلیم‌شدگی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

۴. انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها و مقیاس‌کردن آنها

مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران، شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید تا حد امکان نمایان‌گر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا در هنگام وقوع زلزله باشند. مدت زمان حرکت شدید زمین در شتاب‌نگاشت‌ها نیز دست‌کم برابر با ۱۰ ثانیه یا ۳ برابر زمان تناوب اصلی سازه، هر کدام که بیشتر است، انتخاب می‌شوند.^[۲۲] بر این اساس و با توجه به اینکه محتوای بسامدی شتاب‌نگاشت‌ها (v_{max}/a_{max}) باید نزدیک به هم باشند و نیز این نکته که زلزله‌هایی با PGA (شتاب بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت) مؤلفه‌ی قائم زیاد مد نظر قرار گیرند، نهایتاً ۳ شتاب‌نگاشت زلزله‌های طیس (ایران)، لوما پریتا (کالیفرنیا آمریکا) و چی‌چی (تایوان) انتخاب شد. بدیهی است که زلزله‌هایی با PGA و محتوای بسامدی بالاتر نیز وجود داشتند، اما به دلیل آنکه شامل معیارهای فوق‌الذکر نبودند، از انتخاب آنها صرف‌نظر شد (مشخصات این زلزله‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است).

جهت مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌ها نیز مطابق استاندارد ۲۸۰۰ عمل شده است.^[۲۲] بدین صورت که پس از مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌ها به مقدار بیشینه‌ی خود، طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های افقی مقیاس‌شده با منظورکردن نسبت میرایی ۵٪ با نرم‌افزار SeismoSignal به دست آمده و پس از ترکیب‌کردن طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با روش جذر مربعات، از آنها متوسط‌گیری شده و در محدوده‌ی زمان‌های تناوب ۰/۲T و ۱/۵T با طیف طرح استاندارد مقایسه شده است.

در نهایت، ضرایب مقیاس متفاوتی برای مدل‌های مختلف با استفاده از روش بالا به دست آمده است، که در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌شده (افقی و قائم) ضرب شده است. در جدول ۳، ضرایب مقیاس به دست‌آمده برای مدل آزمایشگاهی و مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های انتخاب‌شده.

نام زلزله	چی‌چی (تایوان)	طیس (ایران)	لوماپریتا (کالیفرنیا)
بیشینه‌ی شتاب افقی (g)	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۵۳
بیشینه‌ی شتاب قائم (g)	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۵۴
نسبت سرعت بیشینه به شتاب بیشینه - افقی (s)	۰/۱۱۳	۰/۱۱۹	۰/۰۶۸
نسبت سرعت بیشینه به شتاب بیشینه - قائم (s)	۰/۰۶۹	۰/۰۶۶	۰/۰۳۳
تعداد داده‌های رکورد	۱۷۹۹۵	۱۶۳۷	۷۹۸۶
بازه‌ی زمانی (s)	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۵
مدت زلزله (s)	۸۹/۹۹	۳۲/۸۲	۳۹/۹۵
مدت زمان حرکت شدید زمین - افقی (s)	۲۱/۷۷	۱۶/۴۸	۱۱/۹۱۵
مدت زمان حرکت شدید زمین - قائم (s)	۱۲/۷۳	۱۳/۹۸	۱۰/۵۹

جدول ۳. ضرایب مقیاس به دست‌آمده برای مدل‌های آزمایشگاهی ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه.

مدل	دوره‌ی تناوب (ثانیه)	ضریب مقیاس
آزمایشگاهی	۰/۱۳	۰/۴۴۸
۳ طبقه	۰/۲۶	۰/۴۵۳
۱۰ طبقه	۰/۶۴	۰/۵۴۹
۲۰ طبقه	۱/۰۸	۰/۸۳

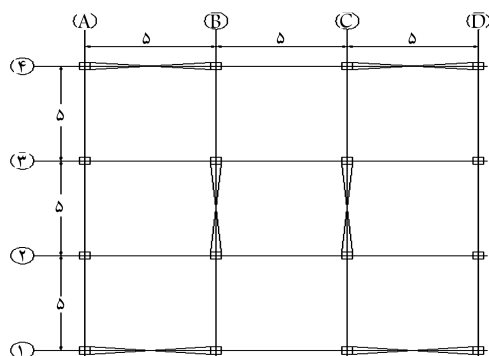
۵. طراحی مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه

در این مطالعه، علاوه بر مدل آزمایشگاهی، مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه که به ترتیب نماد ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه، میان‌مرتبه و بلندمرتبه هستند، تحت تحلیل قرار گرفته‌اند. طراحی دیوارهای برشی فولادی و تعیین ضخامت آنها با استفاده از روش نواری، مطابق آیین‌نامه‌ی UBC-۹۷ صورت گرفته و با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران کنترل شده است. در روش نواری، ورق دیوارهای برشی فولادی با مهاربندهای معادل فقط‌کششی جایگزین می‌شود و بعد از آنکه مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها به دست آمد، با استفاده از روابط روش نواری، ضخامت دیوارهای برشی فولادی به دست می‌آید.^[۱۰]

همچنین پلان مربع‌شکلی با دهانه‌های ۵ متری و ۳ دهانه در هر جهت در نظر گرفته شده است (شکل ۳). ارتفاع طبقات ۳ متر و برای بارگذاری ثقلی با استفاده از آیین‌نامه‌ی مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، کاربری ساختمان‌ها مسکونی و شدت بار مرده‌ی طبقات، بار مرده‌ی بام، بار زنده‌ی طبقات و بار زنده‌ی بام به ترتیب ۶۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است.

توزیع نیروی جانبی در ارتفاع ساختمان براساس استاندارد ۲۸۰۰ زلزله‌ی ایران و با فرض نوع زمین تیپ ۳، شتاب مبنای طرح ۰/۳۵، ضریب اهمیت ۱ و ضریب رفتار ۷ (قاب خمشی فولادی متوسط + مهاربندی هم‌محور فولادی) انجام شده است. همچنین نوع سقف، دال بتنی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و در طراحی‌ها، فولادهای مشابه با مدل آزمایشگاهی به کار رفته‌اند.

قاب دو بعدی یک دهانه، محور B-۲،۳ جهت طراحی دیوارها در نظر گرفته شده است. و از نرم‌افزار Abaqus برای طراحی مدل سه بعدی استفاده شد. این تذکر لازم است که مقاطع ستون‌ها از قوطی، مقاطع تیرها از تیر ورق و مقاطع مهاربندهای معادل از ناودانی دویل انتخاب شده است. بر این اساس مقاطع تیرو ستون قاب‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه به همراه ضخامت نهایی دیوارهای برشی فولادی هر طبقه در جدول‌های ۴ الی ۶ نشان داده شده است.



شکل ۳. پلان مربع مربوط به مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی.

۶. انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی

تحلیل دینامیکی غیرخطی صریح^۱ با دادن شتاب‌نگاشت‌های زلزله بر روی مدل آزمایشگاهی و مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه انجام شده است. این تذکر لازم است که مجموع بار مرده و زنده‌ی معادل با 430 (kg/m) جهت اعمال بر تیرهای طبقات اول و دوم و 358 (kg/m) جهت اعمال بر تیر طبقه‌ی سوم مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است (مدل آزمایشگاهی دارای مقیاس $1/3$ است). همچنین در مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه، بار مرده و زنده‌ی تیرهای طبقات به ترتیب برابر 150 (kg/m) و 50 (kg/m) و نیز بار مرده و زنده‌ی تیر طبقه‌ی آخر به ترتیب برابر 125 و 375 (kg/m) برآورد و اعمال شده است.

۷. بررسی نیروهای اعضا

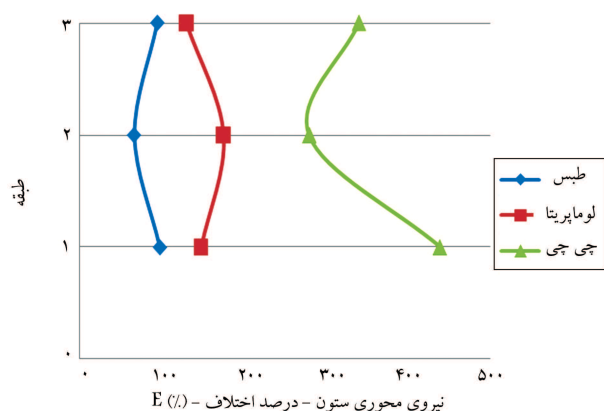
به دنبال اعمال بارهای ثقلی مذکور و شتاب پایه‌ی افقی و قائم ناشی از زلزله‌های طبس، لوما پریتا و چی‌چی و به منظور مطالعه‌ی میزان تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله بر دیوار برشی فولادی، نیروهای محوری و لنگر خمشی ستون‌ها و نیز نیروی برشی تیرها در مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

۷.۱. بررسی نیروی محوری ستون‌ها

نمودار تغییرات درصد اختلاف میان نیروی محوری ستون‌ها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفه‌ی افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفه‌ی افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله طبس، لوما پریتا و چی‌چی و در مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه به ترتیب در شکل‌های ۴ الی ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه‌ی قائم زلزله تأثیر قابل ملاحظه‌ی بر نیروی محوری ستون‌ها در سیستم دیوار برشی فولادی دارد. در مدل ۳ طبقه بین 100 تا 400 درصد، در مدل ۱۰ طبقه بین 200 تا 800 درصد و در مدل ۲۰ طبقه بین 100 تا 1500 درصد، افزایش نیروی محوری ستون‌ها تحت اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله دیده می‌شود.

این مطلب نشان می‌دهد که تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله بر نیروی محوری ستون‌ها در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه و دارای سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه بیشتر است. همچنین در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه، تأثیر



شکل ۴. تغییرات درصد نیروی محوری ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۳ طبقه.

جدول ۴. مقاطع تیر، ستون و ضخامت دیوار برشی فولادی - مدل ۳ طبقه.

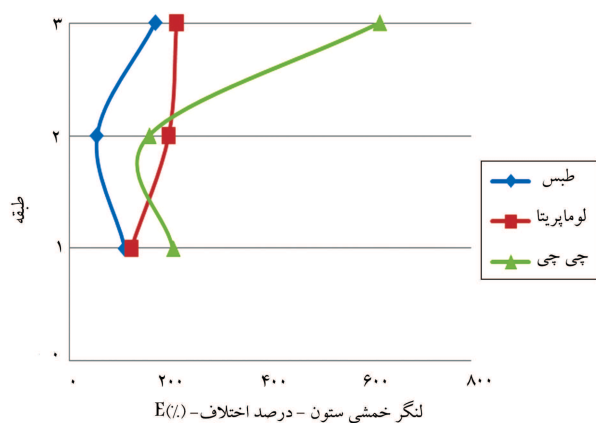
طبقه	ستون	تیر	ضخامت ورق (میلی‌متر)
سوم	Box 25×0.8	Pl $30 \times 1.5 - 15 \times 1.5$	۰/۱
دوم	Box 25×1.2	Pl $30 \times 8 - 15 \times 0.8$	۱/۵
اول	Box 25×1.2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۱/۵

جدول ۵. مقاطع تیر، ستون و ضخامت دیوار برشی فولادی - مدل ۱۰ طبقه.

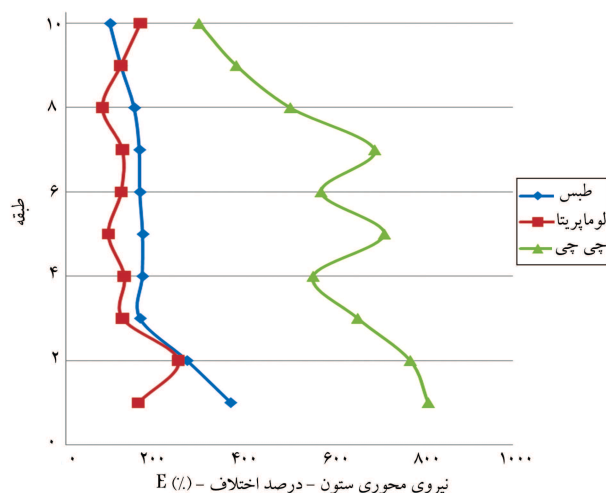
طبقه	ستون	تیر	ضخامت ورق (میلی‌متر)
دهم	Box 25×0.8	Pl $30 \times 1.5 - 15 \times 1.5$	۱/۰
نهم	Box 25×1.2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۱/۵
هشتم	Box 30×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۲/۰
هفتم	Box 30×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۲/۴
ششم	Box 30×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۲/۷
پنجم	Box 35×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۱
چهارم	Box 40×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۴
سوم	Box 50×2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۸
دوم	Box 50×2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۸
اول	Box 50×2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۸

جدول ۶. مقاطع تیر، ستون و ضخامت دیوار برشی فولادی - مدل ۲۰ طبقه.

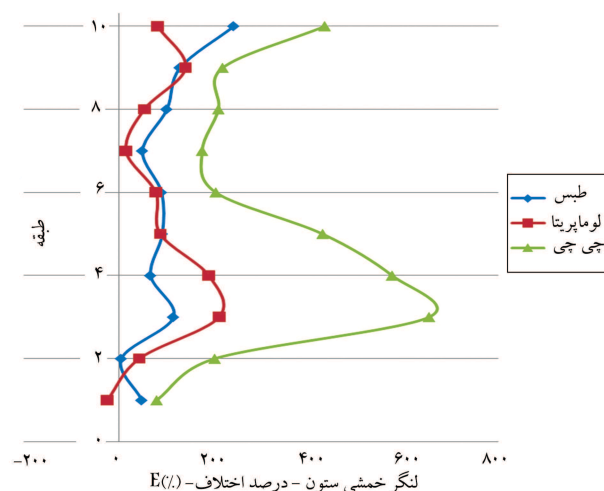
طبقه	ستون	تیر	ضخامت ورق (میلی‌متر)
بیستم	Box 25×1	Pl $30 \times 1.5 - 15 \times 1.5$	۰/۸
نوزدهم	Box 30×1	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۰/۸
هجدهم	Box 30×1	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۱/۳
هفدهم	Box 30×1	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۱/۷
شانزدهم	Box 30×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۲/۴
پانزدهم	Box 30×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۲/۴
چهاردهم	Box 35×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۱
سیزدهم	Box 35×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۱
دوازدهم	Box 40×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۱
یازدهم	Box 40×1.5	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۴
دهم	Box 50×2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۳/۸
نهم	Box 50×2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۵/۰
هشتم	Box 60×2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۵/۰
هفتم	Box 65×2	Pl $30 \times 0.8 - 15 \times 0.8$	۴/۹
ششم	Box 75×2.5	Pl $30 \times 1 - 15 \times 1$	۴/۹
پنجم	Box 75×2.5	Pl $30 \times 1 - 15 \times 1$	۵/۰
چهارم	Box 80×3	Pl $30 \times 1 - 15 \times 1$	۵/۰
سوم	Box 95×4	Pl $30 \times 1 - 15 \times 1$	۵/۰
دوم	Box 100×5	Pl $30 \times 1 - 15 \times 1$	۵/۱
اول	Box 100×5	Pl $30 \times 1 - 15 \times 1$	۵/۱



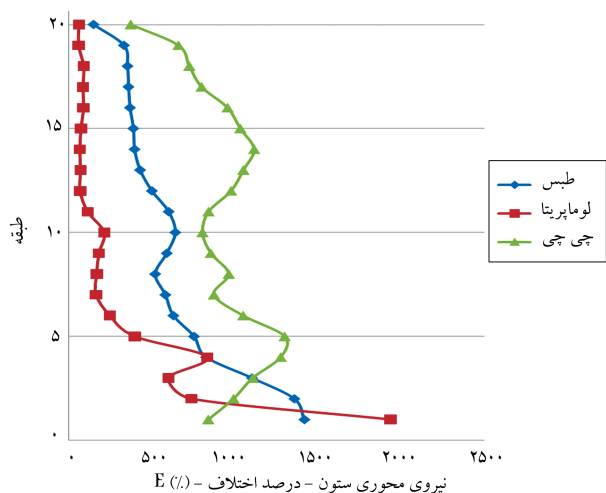
شکل ۷. تغییرات درصد لنگر خمشی ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۳ طبقه.



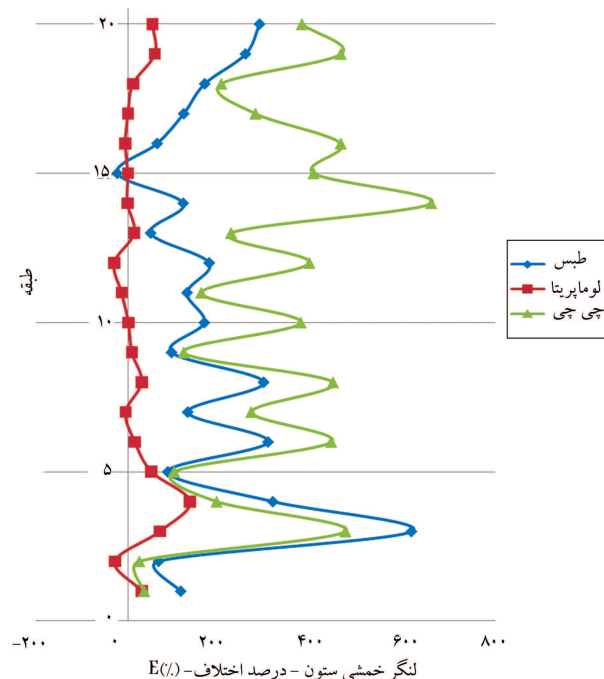
شکل ۵. تغییرات درصد نیروی محوری ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقه.



شکل ۸. تغییرات درصد لنگر خمشی ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقه.



شکل ۶. تغییرات درصد نیروی محوری ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقه.



شکل ۹. تغییرات درصد لنگر خمشی ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقه.

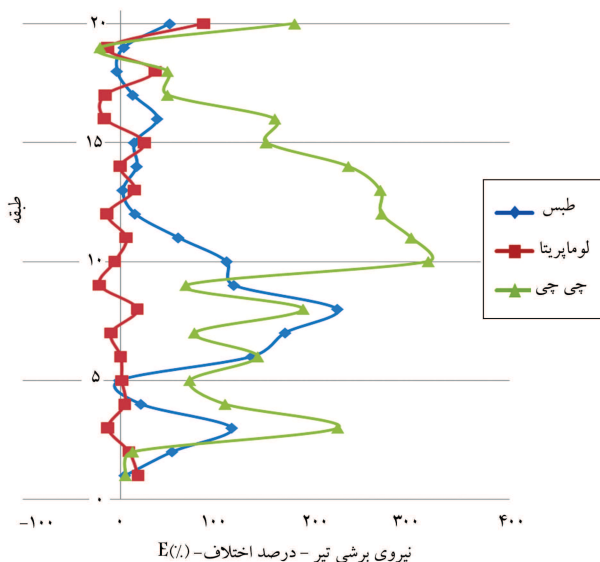
مؤلفه‌ی قائم زلزله بیشتر در طبقات بالایی است؛ اما در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه، این مؤلفه بیشتر در طبقات تحتانی تأثیر می‌گذارد.

۲.۷. بررسی لنگر خمشی ستون‌ها

نمودار تغییرات درصد اختلاف میان لنگر خمشی ستون‌ها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفه‌ی افقی و قائم و نیز اثر فقط مؤلفه‌ی افقی بر حسب طبقات تحت ۳ زلزله و در مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه دارای سیستم دیوار برشی فولادی به ترتیب در شکل‌های ۷ الی ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه‌ی قائم زلزله تأثیر قابل ملاحظه‌ی بر لنگر خمشی ستون‌ها دارد. در تمامی مدل‌ها تقریباً بین ۱۰۰ تا ۶۰۰ درصد افزایش لنگر خمشی ستون‌ها تحت اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله دیده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش ارتفاع سازه تأثیری در میزان بیشتر این مؤلفه ندارد.

بر این اساس در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه دارای سیستم دیوار برشی فولادی، تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله بر لنگر خمشی ستون‌ها بیشتر در طبقات بالایی است، اما در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه این مؤلفه بیشتر در طبقات میانی مؤثر است.



شکل ۱۲. تغییرات درصد نیروی برشی تیرها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقه.

۸. بررسی روند تشکیل مفاصل خمیری

با بررسی تنش تیرها و ستون‌ها، روند تشکیل مفاصل خمیری در ۳ زلزله‌ی لوماپریتا، طیس و چی چی در حالت اثر مؤلفه‌ی افقی و اثر هم‌زمان مؤلفه‌ی افقی و قائم زلزله مشاهده شده است.

روند تشکیل مفاصل خمیری در مدل آزمایشگاهی تحت ۳ زلزله‌ی طیس، لوماپریتا و چی چی در دو حالت اثر مؤلفه‌ی افقی تنها و نیز اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نشان داده شده است. در بررسی‌ها معیار تنش فون میسز به عنوان معیار تشکیل مفصل خمیری در اعضا تیر و ستون در نظر گرفته شده است و اعداد نشان‌دهنده بر روی تیرها و ستون‌ها ترتیب توالی تشکیل مفاصل خمیری را نشان می‌دهند.

مطابق شکل ۱۳، تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله، مفاصل خمیری در نمونه‌ی آزمایشگاهی به طور کلی ابتدا در پای ستون‌های طبقه‌ی اول، تیر طبقه‌ی اول، تیر طبقه‌ی دوم و سپس قسمت فوقانی ستون طبقه‌ی اول تشکیل می‌شود.

در زمانی که مؤلفه‌ی قائم نیز با مؤلفه‌ی افقی همراه می‌شود، مفصل خمیری در کلیه‌ی تیرها و ستون‌ها تشکیل می‌شود، به گونه‌یی که مفاصل خمیری ابتدا در تیرهای طبقات اول و دوم، پای ستون طبقه‌ی اول، قسمت فوقانی ستون طبقه‌ی اول، ستون طبقه‌ی دوم، تیر طبقه‌ی سوم و سپس ستون طبقه‌ی سوم تشکیل می‌شود (شکل ۱۴).

شکل‌های ۱۵ و ۱۶، روند تشکیل مفاصل خمیری در مدل ۳ طبقه تحت ۳ زلزله را در دو حالت اثر مؤلفه‌ی افقی و نیز اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم را به ترتیب نشان می‌دهند.

مطابق شکل ۱۵، تحت اثر مؤلفه‌ی افقی، مفاصل خمیری به طور کلی ابتدا در پای ستون‌های طبقه‌ی اول، قسمت فوقانی ستون طبقه‌ی اول و ستون‌های طبقه‌ی دوم تشکیل می‌شوند.

در زمانی که مؤلفه‌ی قائم نیز با مؤلفه‌ی افقی همراه می‌شود، مفاصل خمیری در کلیه‌ی تیرها و ستون‌ها تشکیل می‌شود. به گونه‌یی که مفاصل خمیری ابتدا در تیرهای طبقات اول و دوم، پای ستون طبقه‌ی اول، قسمت فوقانی ستون طبقه‌ی اول،

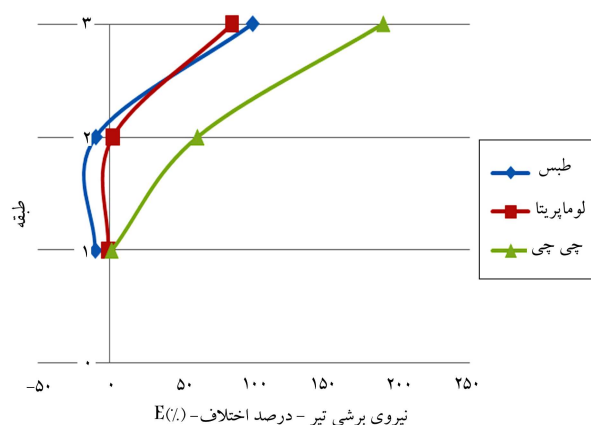
۳.۷. بررسی نیروی برشی تیرها

نمودار تغییرات درصد اختلاف میان نیروی برشی تیرها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفه‌ی افقی و قائم و نیز اثر فقط مؤلفه‌ی افقی بر حسب طبقات تحت ۳ زلزله و در مدل‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه دارای سیستم دیوار برشی فولادی به ترتیب در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ نشان داده شده است.

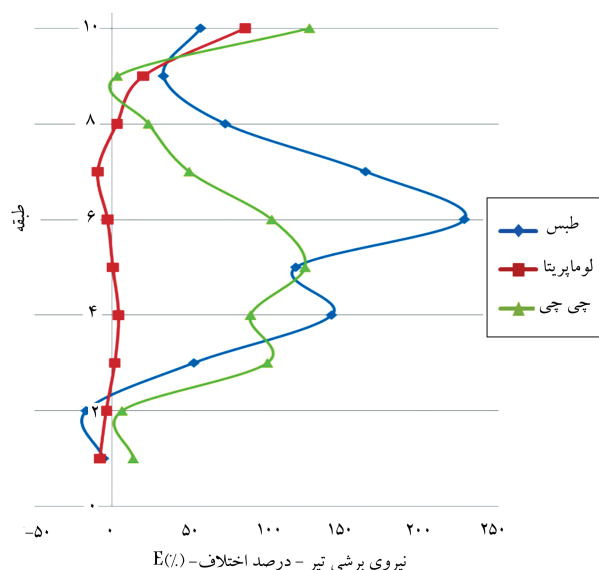
همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه‌ی قائم زلزله تأثیر کمتری بر نیروی برشی تیرها در سیستم دیوار برشی فولادی دارد.

در مدل ۳ طبقه بین ۲۰ تا ۲۰۰ درصد، در مدل ۱۰ طبقه بین ۲۰ تا ۲۵۰ درصد و در مدل ۲۰ طبقه بین ۲۰ تا ۳۰۰ درصد، مؤلفه‌ی قائم باعث افزایش نیروی برشی می‌شود و این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع سازه اثر فوق‌العاده ناچیزی در افزایش نیروی برشی تیرها در سیستم دیوار برشی فولادی دارد.

براین اساس در ساختمان‌های کوتاه مرتبه تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله بر نیروی برشی تیرها بیشتر در طبقات بالایی است، اما در ساختمان‌های میان مرتبه و بلندمرتبه، این مؤلفه بیشتر در طبقات میانی مؤثر است.



شکل ۱۰. تغییرات درصد نیروی برشی تیرها بر حسب طبقات در مدل ۳ طبقه.



شکل ۱۱. تغییرات درصد نیروی برشی تیرها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقه.

قسمت فوقانی ستون طبقه سوم، ستون‌های طبقه دوم، قسمت تحتانی ستون طبقه سوم و سپس تیر طبقه سوم تشکیل می‌شود (شکل ۱۶). روند تشکیل مفاصل خمیری در مدل ۱۰ طبقه، تحت ۳ زلزله در دو حالت اثر مؤلفه افقی تنها و نیز اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود.

از آنجا که تعداد طبقات در مدل ۱۰ طبقه نسبت به مدل آزمایشگاهی و ۳ طبقه بیشتر است، لذا جهت بررسی بهتر نحوه تشکیل مفاصل خمیری، قاب به طبقات تحتانی (طبقات ۱-۳)، طبقات میانی (طبقات ۴-۷) و طبقات فوقانی (طبقات ۸-۱۰) تقسیم بندی می‌شود.

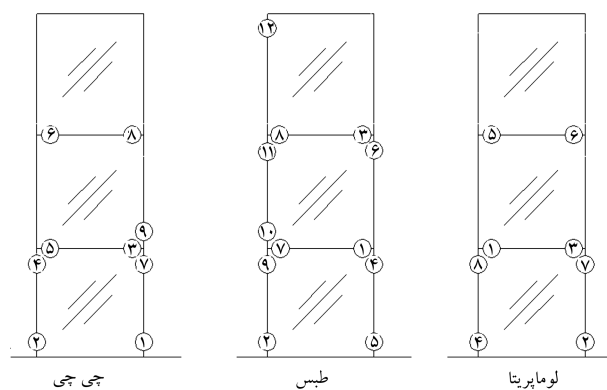
مطابق شکل ۱۷، تحت اثر مؤلفه افقی، مفاصل خمیری ابتدا در ستون‌های طبقات تحتانی، ستون‌های طبقات میانی و سپس در تیرهای طبقات تحتانی اتفاق می‌افتند.

در زمانی که مؤلفه قائم نیز با مؤلفه افقی همراه می‌شود، مشاهده می‌شود که مفاصل خمیری تقریباً در کلیه تیرها و ستون‌ها تشکیل شده است، به گونه‌ای که این مفاصل ابتدا در تیرهای طبقات تحتانی، ستون‌های طبقات میانی، تیرهای طبقات میانی، ستون‌های طبقات فوقانی، تیرهای طبقات تحتانی، ستون‌های فوقانی و ستون‌های فوقانی اتفاق می‌افتد (شکل ۱۸). شکل‌های ۱۹ و ۲۰، روند تشکیل مفاصل خمیری در مدل ۲۰ طبقه تحت ۳ زلزله را در دو حالت اثر مؤلفه افقی تنها و نیز اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم نشان می‌دهند.

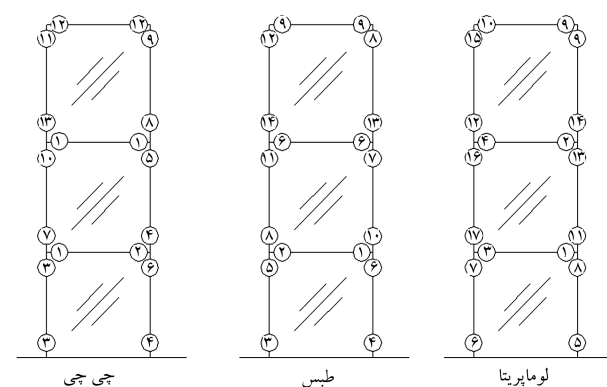
جهت بررسی بهتر نحوه تشکیل مفاصل خمیری در مدل ۲۰ طبقه، قاب به طبقات تحتانی (طبقات ۱-۶)، طبقات میانی (طبقات ۷-۱۴) و طبقات فوقانی (طبقات ۱۵-۲۰) تقسیم بندی شده است.

مطابق شکل ۱۹، تحت اثر مؤلفه افقی، مفاصل خمیری به طور کلی ابتدا در تیرهای طبقات تحتانی و سپس ستون‌های طبقات تحتانی اتفاق می‌افتد.

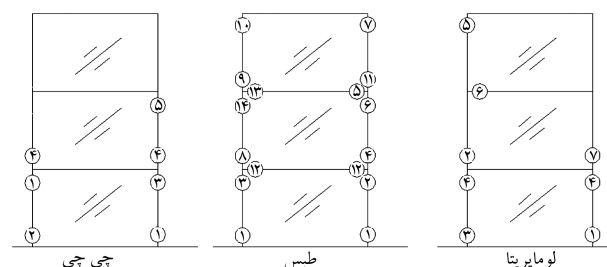
در زمانی که مؤلفه قائم نیز با مؤلفه افقی همراه شود، مشاهده می‌شود که مفاصل خمیری تقریباً در کلیه تیرها و ستون‌ها تشکیل می‌شود. به گونه‌ای که مفاصل خمیری ابتدا در تیرهای طبقات تحتانی، تیرهای طبقات میانی، ستون‌های



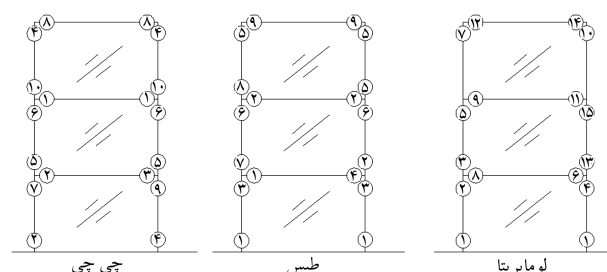
شکل ۱۳. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل آزمایشگاهی تحت اثر مؤلفه افقی زلزله.



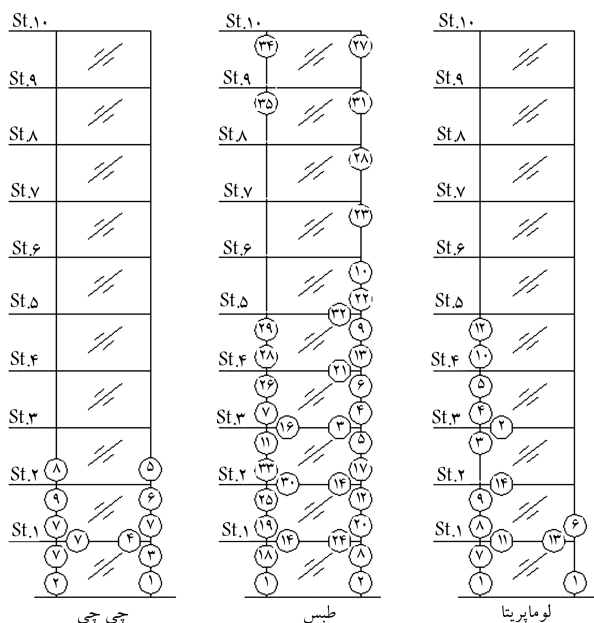
شکل ۱۴. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل آزمایشگاهی تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله.



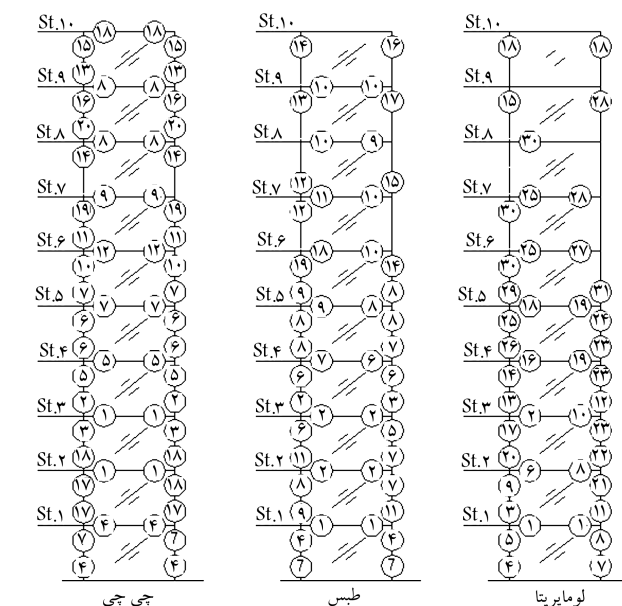
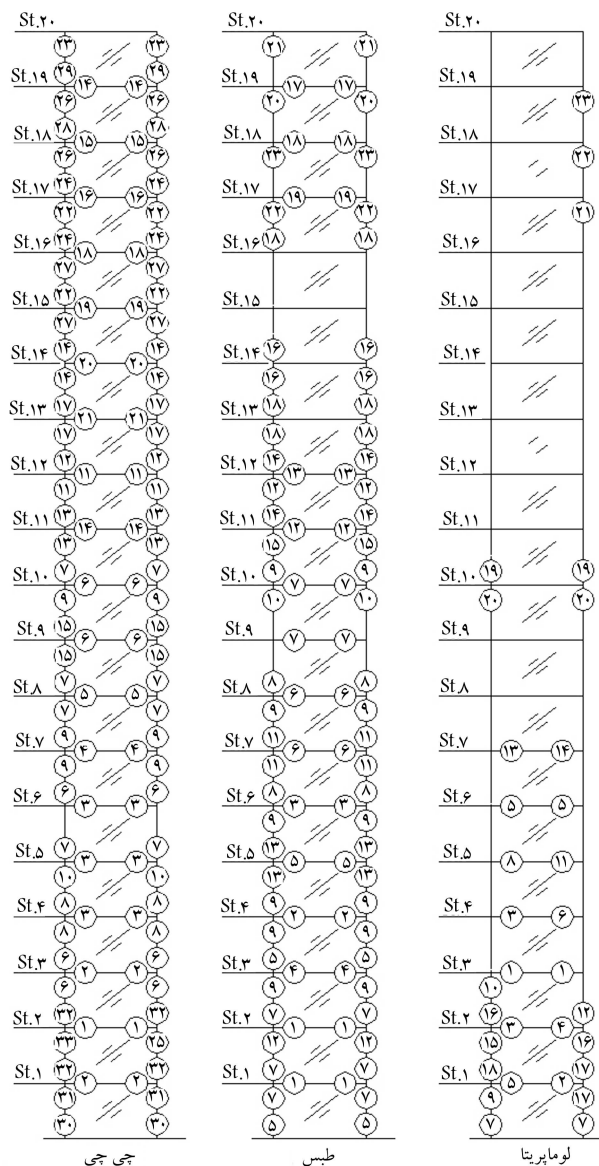
شکل ۱۵. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل ۳ طبقه تحت اثر مؤلفه افقی زلزله.



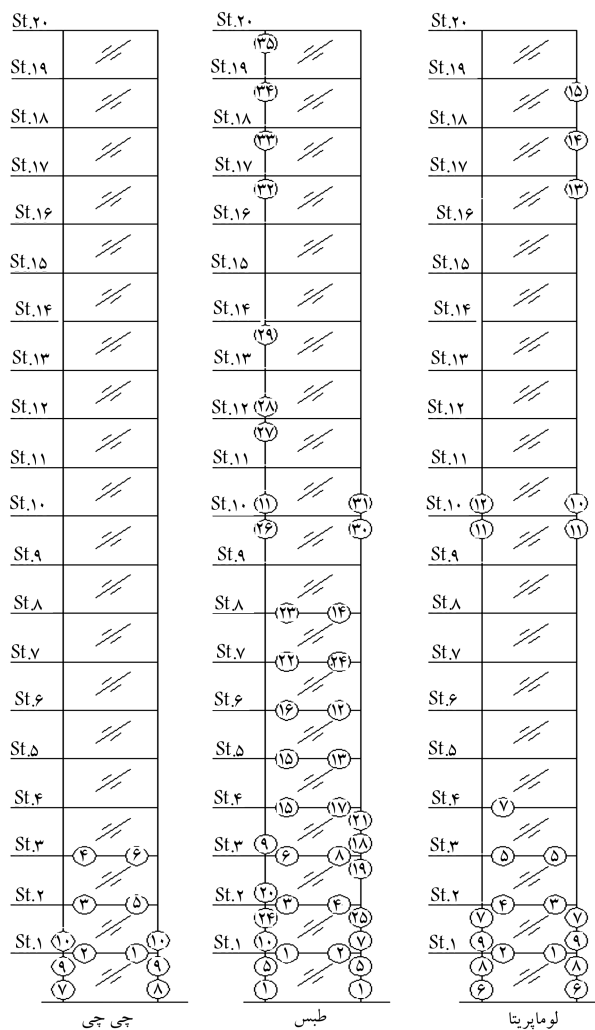
شکل ۱۶. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل ۳ طبقه تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله.



شکل ۱۷. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل ۱۰ طبقه تحت اثر مؤلفه افقی زلزله.



شکل ۱۸. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل ۱۰ طبقه تحت اثر هم زمان مؤلفه های افقی و قائم زلزله.



شکل ۱۹. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل ۲۰ طبقه تحت اثر مؤلفه های افقی زلزله.

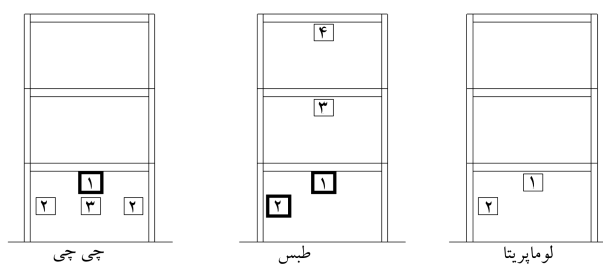
شکل ۲۰. روند تشکیل مفاصل خمیری مدل ۲۰ طبقه تحت اثر هم زمان مؤلفه های افقی و قائم زلزله.

طبقه های میانی، ستون های طبقات تحتانی، تیرهای طبقات فوقانی و سپس ستون های طبقات فوقانی اتفاق می افتد (شکل ۲۰).

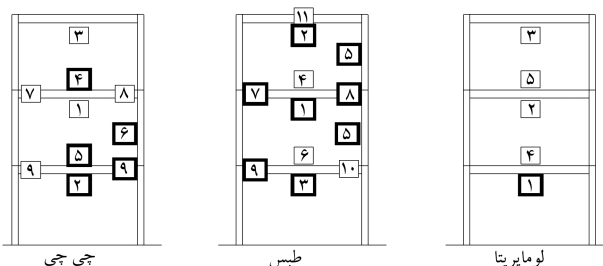
۹. بررسی مودهای شکست

مودهای شکست در مدل های دیوار برشی فولادی با استفاده از معیار کرنش خمیری و تنش های سه محوری و همچنین نرخ کرنش مورد بررسی قرار گرفتند.

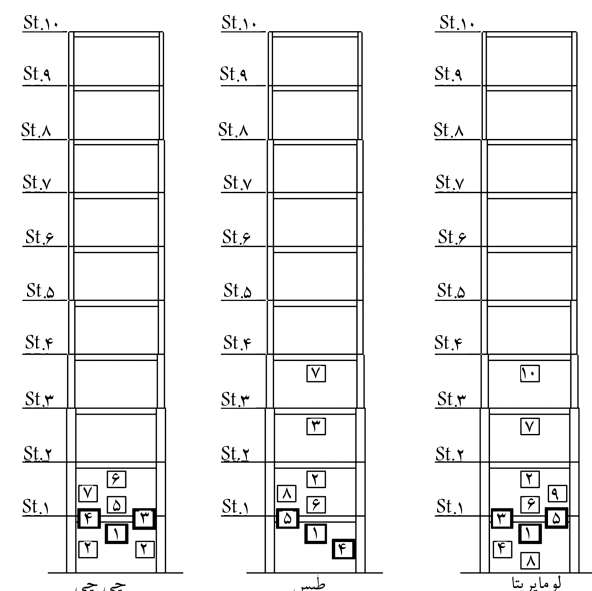
محل های موضعی شروع شکست در اعضا مختلف ورق، تیر و ستون، در مدل آزمایشگاهی تحت ۳ زلزله ی لوماپریتا، طیس و جی جی در ۲ حالت اثر فقط مؤلفه ی افقی و اثر هم زمان مؤلفه های افقی و قائم زلزله به ترتیب در شکل های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. اعداد داخل مربع ها نشان دهنده ی توالی شروع شکست هستند. مربع های پررنگ تر نقاطی هستند که شکست در آنها کاملاً انجام شده است. سایر



شکل ۲۳. روند شروع شکست در اعضا مختلف مدل ۳ طبقه تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله.



شکل ۲۴. روند شروع شکست در اعضا مختلف مدل ۳ طبقه تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله.

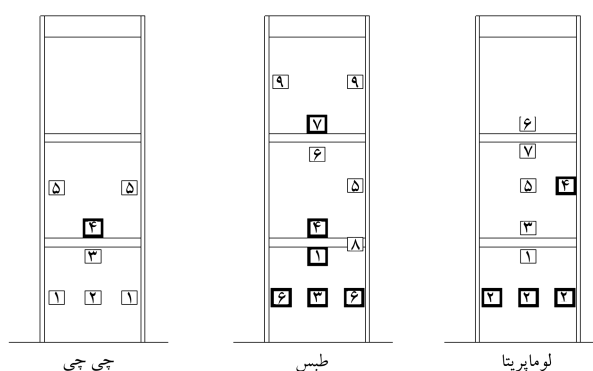


شکل ۲۵. روند شروع شکست در اعضا مختلف مدل ۱۰ طبقه تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله.

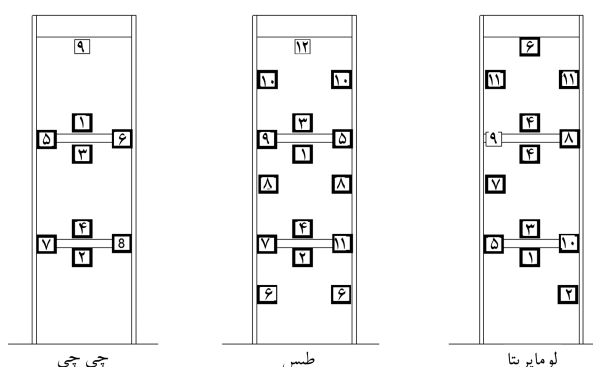
۳ زلزله در دو حالت اثر فقط مؤلفه‌ی افقی و اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله به ترتیب در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲۵، شکست تحت اثر مؤلفه‌ی افقی به طور کلی در ورق‌های طبقات تحتانی (قسمت‌های فوقانی - تحتانی و کناره‌ها) و نیز تیرهای طبقات تحتانی (فقط طبقه‌ی اول) رخ می‌دهد.

در زمانی که مؤلفه‌ی قائم نیز با مؤلفه‌ی افقی همراه می‌شود، ابتدا شکست در محل تعدادی از اتصال‌های ورق‌ها به تیرهای طبقات تحتانی شروع می‌شود و پس از آنکه ستون طبقه‌ی سوم (قسمت تحتانی) دچار شکست شد، شکست در بقیه‌ی اتصال‌های ورق‌ها به تیرهای طبقات تحتانی ادامه می‌یابد.



شکل ۲۶. روند شروع خرابی یا شکست در اعضا مختلف مدل آزمایشگاهی تحت اثر مؤلفه‌ی افقی.



شکل ۲۷. روند شروع خرابی یا شکست در اعضا مختلف مدل آزمایشگاهی تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم.

مربع‌ها، نشان‌دهنده‌ی شکست یا پارگی هستند.

مطابق شکل ۲۶، خرابی تحت اثر مؤلفه‌ی افقی به‌طور کلی در قسمت فوقانی ورق طبقه‌ی اول آغاز و پس از گسترش آن به نقاط کناری و وسط دیوار، روند شکست در ورق طبقه‌ی دوم شروع می‌شود.

در زمانی که مؤلفه‌ی قائم نیز با مؤلفه‌ی افقی همراه می‌شود، مشاهده می‌شود که به‌طور کلی ابتدا شکست در محل ورق‌ها در تیرهای طبقات اول و دوم شروع و پس از آنکه تیرهای طبقات دوم و اول و کناره‌های ورق‌های طبقات اول، دوم و سوم دچار شکست می‌شوند، قسمت فوقانی ورق طبقه‌ی سوم نیز دچار پارگی می‌شود (شکل ۲۷).

محل‌های موضعی شروع شکست در اعضا مختلف، در مدل ۳ طبقه تحت ۳ زلزله در ۲ حالت اثر فقط مؤلفه‌ی افقی و اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم به ترتیب در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲۳، شکست تحت اثر مؤلفه‌ی افقی به‌طور کلی در قسمت فوقانی ورق طبقه‌ی اول آغاز می‌شود و پس از آن به نقاط کناری و وسط ورق گسترش می‌یابد.

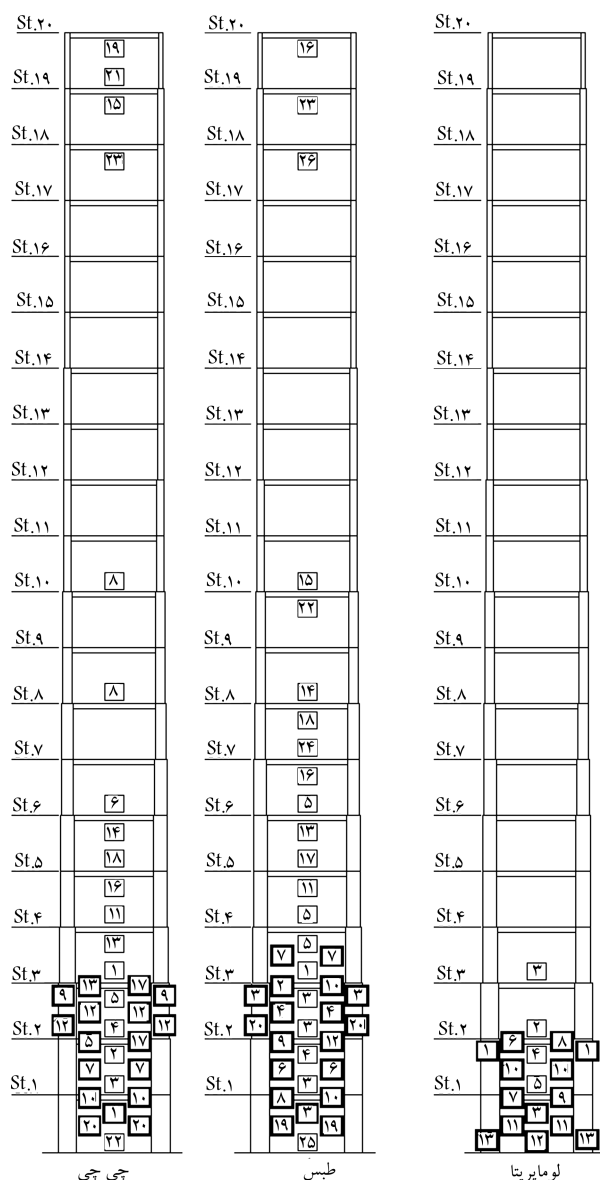
در زمانی که مؤلفه‌ی قائم نیز با مؤلفه‌ی افقی همراه می‌شود، مشاهده می‌شود که به‌طور کلی ابتدا شکست در محل اتصال ورق‌ها به تیرهای طبقات اول، دوم و سوم شروع می‌شود و پس از آنکه کناره‌های ورق‌های طبقات دوم و سوم دچار شکست شدند، خرابی در تیرهای طبقات دوم و اول (محل اتصال به ستون‌ها) اتفاق می‌افتد (شکل ۲۴).

محل‌های موضعی شروع شکست در اعضا مختلف، در مدل ۱۰ طبقه تحت

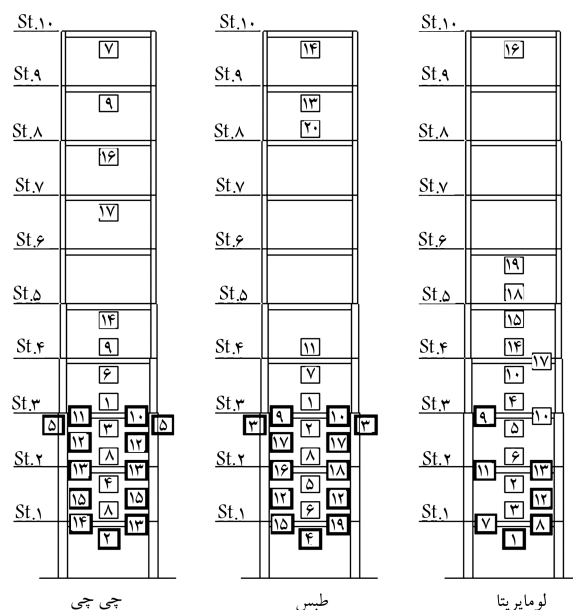
پس از آن شکست در اتصال‌های ورق‌ها به طبقات میانی رخ می‌دهد و در ادامه، تیرهای طبقات تحتانی به همراه کناره‌های ورق‌های تحتانی دچار شکست می‌شوند و در نهایت، در محل اتصال پانل‌ها به تیرهای طبقات فوقانی خرابی ایجاد می‌شود (شکل ۲۶).

محل‌های موضعی شروع شکست در اعضا مختلف، در مدل ۲۰ طبقه تحت ۳ زلزله در دو حالت اثر مؤلفه‌ی افقی تنها و اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم به ترتیب در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ نشان داده شده است.

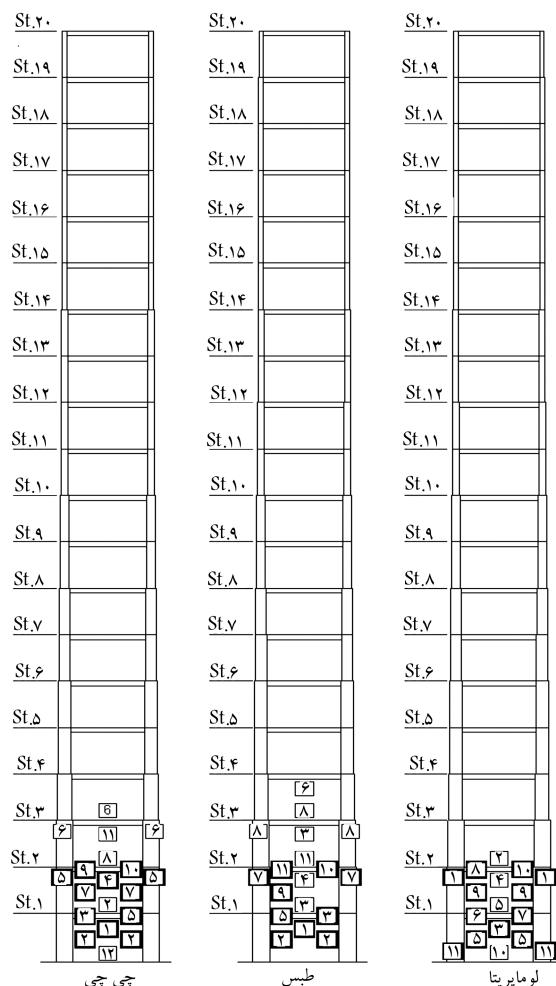
مطابق شکل ۲۷، شکست تحت اثر مؤلفه‌ی افقی به طور کلی ابتدا در تعدادی از اتصال‌های ورق‌ها به تیرهای طبقات تحتانی شروع و پس از آن ستون طبقه سوم در قسمت تحتانی دچار شکست می‌شود. شکست در بقیه‌ی اتصال‌های ورق‌ها به تیرهای طبقات تحتانی به همراه کناره‌های ورق‌ها و نیز تیرهای طبقات تحتانی ادامه می‌یابد.



شکل ۲۸. روند شروع شکست در اعضا مختلف مدل ۲۰ طبقه تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله.



شکل ۲۶. روند شروع شکست در اعضا مختلف مدل ۱۰ طبقه تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله.



شکل ۲۷. روند شروع شکست در اعضا مختلف مدل ۲۰ طبقه تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله.

در زمانی که مؤلفه‌ی قائم نیز با مؤلفه‌ی افقی همراه می‌شود، ابتدا شکست در محل تعدادی از اتصال‌های ورق‌ها به تیرهای طبقات تحتانی شروع می‌شود و پس از آنکه ستون طبقه‌ی سوم (قسمت تحتانی) دچار شکست شد، شکست در بقیه‌ی اتصال‌های ورق‌ها به تیرهای طبقات تحتانی ادامه می‌یابد. سپس شکست در اتصال‌های ورق‌ها به طبقات میانی رخ می‌دهد و در ادامه، تیرهای طبقات تحتانی به همراه کناره‌های ورق‌های طبقات تحتانی دچار شکست می‌شود و در نهایت، در محل اتصال ورق‌ها به تیرهای طبقات فوقانی خرابی ایجاد می‌شود (شکل ۲۸).

۱۰. نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه‌ی قائم زلزله تأثیر قابل ملاحظه‌یی در نیروی محوری ستون‌ها (بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ درصد) دارد. تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله در نیروی محوری ستون‌ها در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه نسبت به ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه بیشتر است و در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله بیشتر در طبقات بالایی است، اما در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه این مؤلفه بیشتر در طبقات تحتانی مؤثر است.

همچنین مؤلفه‌ی قائم زلزله تأثیر قابل ملاحظه‌یی بر لنگر خمشی ستون‌ها (بین ۱۰۰ تا ۶۰۰ درصد) دارد و افزایش ارتفاع سازه در تأثیر بیشتر این مؤلفه اثری ندارد. در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله بر لنگر خمشی ستون‌ها بیشتر در طبقات بالایی است، اما در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه‌ی این مؤلفه بیشتر در طبقات میانی مؤثر است.

مؤلفه‌ی قائم زلزله تأثیر کمتری بر نیروی برشی تیرها (بین ۲۰ تا ۳۰ درصد) دارد. افزایش ارتفاع سازه تأثیر فوق‌العاده ناچیزی در افزایش اثر این مؤلفه دارد. در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله در نیروی برشی تیرها بیشتر در طبقات بالایی است، اما در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه این مؤلفه بیشتر در طبقات میانی اثر می‌گذارد.

بررسی روند تشکیل مفصل خمیری در تمامی مدل‌ها نشان داد در حالتی که فقط مؤلفه‌ی افقی زلزله وجود دارد، مفصل خمیری فقط در تیر و ستون‌های طبقات تحتانی و اندکی نیز در ستون‌های طبقات میانی و فوقانی تشکیل می‌شود، در حالی که با همراه شدن مؤلفه‌ی قائم، تیر و ستون‌های کل طبقات دچار تسلیم‌شدگی می‌شود، که این مسئله نشان از اثر قابل توجه مؤلفه‌ی قائم زلزله دارد.

نکته‌ی قابل توجه دیگر تفاوت در روند تشکیل مفصل خمیری در حالت اثر فقط مؤلفه‌ی افقی و حالت اثر هم‌زمان مؤلفه‌ی قائم و افقی است. بدین ترتیب که

مفاصل خمیری در حالت اثر فقط مؤلفه‌ی افقی، ابتدا در تیرها و ستون‌های طبقات تحتانی و سپس در تیرها و ستون‌های طبقات میانی و فوقانی تشکیل می‌شود. به بیان دیگر تشکیل مفصل خمیری در سازه از طبقات پایین شروع می‌شود و در صورت قوی‌تر بودن زلزله به طبقات بالاتر گسترش می‌یابد. اما با همراه شدن مؤلفه‌ی قائم، مفاصل خمیری ابتدا در تیرهای طبقات تحتانی و میانی و سپس ستون‌های طبقات میانی تشکیل می‌شود. بدین ترتیب همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر مؤلفه‌ی قائم، بیشتر در تیرها و ستون‌های طبقات میانی و تأثیر مؤلفه‌ی افقی بیشتر در طبقات تحتانی است.

بر این اساس می‌توان مشاهده کرد که با انتخاب فولاد نرم در ورق و فولاد پر مقاومت در تیرها و ستون‌های دیوار برشی فولادی، تسلیم‌شدگی اعضاء تحت مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله ابتدا در ورق‌ها، سپس تیرها و در نهایت در ستون‌ها تشکیل می‌شود (به صورت کنترل‌شده). پایداری ستون‌ها باعث پایداری کل سیستم می‌شود و این از مزایای دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر است.

با توجه به مشاهده‌ی نتایج مودهای شکست در حالتی که فقط مؤلفه‌ی افقی وجود دارد، شکست ابتدا در ورق‌های طبقات تحتانی (قسمت‌های فوقانی، تحتانی، کناره‌ها و وسط) اتفاق می‌افتد و پس از شکست تیرهای طبقات تحتانی، در صورت قوی‌تر بودن مؤلفه‌ی افقی، این شکست به طبقات میانی و فوقانی گسترش می‌یابد. اما در حالتی که مؤلفه‌ی قائم نیز اثر می‌کند، شکست ابتدا در محل اتصال ورق‌ها به تیرها در طبقات تحتانی و میانی رخ می‌دهد و پس از آنکه تیرها در طبقات تحتانی و میانی دچار شکست شدند، خرابی‌ها به کناره‌های ورق‌ها در طبقات تحتانی و میانی گسترش می‌یابد.

بر این اساس، اثر مؤلفه‌ی افقی بیشتر در ورق‌های طبقات تحتانی و اثر مؤلفه‌ی قائم بر روی تیرها و محل اتصال آنها به ورق طبقات میانی و تحتانی بیشتر مشاهده می‌شود.

از طرفی دیگر در مدل آزمایشگاهی ۳ طبقه مشاهده شد که خرابی ابتدا در ورق‌ها و سپس تیرها به وجود می‌آید. اما ستون‌ها و تیر طبقه‌ی سوم دچار هیچ‌گونه شکست و خرابی نشده است. در مدل‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه نیز همین روند دنبال می‌شود، با این تفاوت که ستون‌ها در طبقات سوم دچار شکست می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه بیشتر است.

این مسئله، مزیت سیستم دیوار برشی فولادی را در برابر مؤلفه‌های قائم و افقی زلزله نشان می‌دهد، که جذب انرژی، تسلیم و خرابی ابتدا در ورق‌ها رخ می‌دهد و سپس تیرها دچار خرابی می‌شوند. اما ستون‌ها همچنان پایدار هستند. به عبارت دیگر، با استفاده از فولاد نرم در ورق‌ها می‌توان آنها را همانند یک فیوز به‌عنوان نگهدارنده و مستهلک‌کننده‌ی نیروی زلزله در طراحی قاب و ساختمان در نظر گرفت.

پانویس

1. explicit

منابع (References)

1. Momeni, A.M. and et al. "Simultaneous effect of horizontal and vertical components of earthquake on axial forces

of columns and story shear of regular moment resisting steel frame buildings", *J. Bana*, **40**, pp. 9-21 (2000).

2. Khoshnodian, F. and Hosseini, A. "Effects of three seismic components on dynamical behavior of asymmetric steel buildings", *1st National Congress of Civil Engineering*, Sharif University of Technology (2004).
3. Iyengar, R. and Shinozuka, M. "Effect of self-weight and vertical acceleration on the behavior of tall structures during earthquake", *J. Earthquake Engineering*

- and Structural Dynamics*, **1**(1), pp. 69-78 (1972).
4. Salazar, A.R. and Haldar, A. "Structural responses considering the vertical component of earthquakes", *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **74**(2), pp. 131-145 (2000).
5. Diotallevi, P.P. and Landi, L. "Effect of the axial force and of the vertical ground motion component on the seismic response of R/C frames", *Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No. 1026 (2000).
6. Alaghebandian, R. and et al. "Effect of distributed mass on earthquake response of reinforced concrete frames", *Proc. Of 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No. 2230 (2000).
7. Ju, S.H. and et al. "3D analyses of buildings under vertical component of earthquake", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **126**(10), pp. 1196-1202 (2000).
8. Hosseini, M. and Firoozi Nezamabadi, M. "A study on the effect of vertical ground acceleration on the seismic response of steel buildings", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C. Canada (2004).
9. Hisada, T. and et al. "Studies on the orthogonal effects in seismic analyses", *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo- Kyoto, Japan (2-9 August 1988).
10. Sadeghvaziri, M.A. and Foutch, D.A. "Dynamic behavior of RC highway bridges under combined effect of vertical and horizontal motions", *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **20**(6), pp. 535-549 (1991).
11. Hasankhani, A. "Study of vertical component of earthquake on bridge", Master Thesis in Civil Engineering-Structural Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (1996).
12. Akbari Kuchkche, H. "Study of effects of vertical component of earthquake on response of building frames", Master Thesis in Civil Engineering-Structural Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (1997).
13. Mirghaderi, R. and et al. "Study of vulnerability of beams under vertical component of earthquake within linear behavior", *J. Bana*, (18 and 19), pp.23-39 (2004).
14. Gholhaki, M. and Rezayifar, O. "Evaluation of determination methods of shear capacity of steel shear walls", *1st International Conference on Seismic Retrofitting*, Tabriz, Iran (2008).
15. Thorburn, L.J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J. "Analysis of steel plate Shear walls", Structural Engineering Report No.107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada (1983).
16. Timler, P.A. and Kulak, G.L. "Experimental study of steel plate shear walls", Structural Engineering Report No. 114, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada (1983).
17. Elgaaly, M., Caccese, V. and Du, C. "Postbuckling behavior of steel plate shear walls under cyclic loads", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **119**(2), pp. 588-605 (1993).
18. Sabouri Ghomi, S. and Roberts, T.M. "Nonlinear dynamic analysis of thin steel plate shear walls", *Computers and Structures*, **39**(1/2), pp. 121-127 (1991).
19. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. "Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels", *Thin Walled Structures*, **12**(2), pp. 145-162 (1991).
20. Vian, D. and Bruneau, M. "Testing of special LYS steel plate shear walls", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 978, Vancouver, British Columbia, Canada (2004).
21. Gholhaki, M. "Study of behavior of thin steel plate shear walls and effect of beam to columns connections in them", PhD Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran (2007).
22. Building and Housing Research Center (BHRC), *Iran Earthquake Code*, Standard 2800, 3rd edition (2005).