تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵

DOI: 10.48303/bese.2021.245138

نوع مقاله: یادداشت فنی

مطالعه موردی رفتار لرزه‌ای سازه بنایی کلافدار در زلزله سرپل ذهاب با ساده‌سازی مدل المان محدود بر اساس مشاهدات مودهای شکست

محمدرضا تابش‌پور
دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

آزاده نوری‌فرد (نویسنده مسئول)
استاد مدعو، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، azadeh.noorifard@ut.ac.ir

چکیده
ساختمان بنایی کلافدار که در آن تمام یا بخشی از بارهای قائم و تمامی بار جانبی در هر دو امتداد اصلی ساختمان توسط دیوارهای با مصالح بنایی غیرمسلح تحمل می‌شود، در بخش مدیترانه‌ای اروپا، آمریکای لاتین، خاورمیانه، آسیای جنوبی و خاور دور به‌صورت گسترده‌ای رواج دارد. تجارب زلزله‌های گذشته و نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد ساختمان‌های بنایی کلافدار اگر به‌درستی ساخته شده باشند پاسخ لرزه‌ای مناسبی نشان خواهند داد. در نتیجه جایی که مصالح بنایی به دلایل اقتصادی و سنتی به‌صورت گسترده استفاده می‌شود، یک انتخاب خوب برای نواحی لرزه‌خیز است. در این مقاله نخست به بررسی میدانی پنج ساختمان بنایی پس از زلزله سرپل ذهاب پرداخته شده است. نتیجه این مطالعات نشان می‌دهد رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی کلافدار در مقایسه با ده‌ها ساختمان اسکلت بتنی و فولادی که آسیب جدی دیده‌اند بسیار مطلوب‌تر بوده است. در ادامه رفتار دو گونه اصلی از ساختمان‌های بنایی دو طبقه سرپل ذهاب شامل دیوار بنایی با کلاف افقی و دیوار بنایی با کلاف افقی و قائم به‌صورت المان محدود در نرم‌افزار آباکوس تحلیل گردیده است. با استفاده از تحلیل خطی المان محدود به‌خوبی مسیر بار و ترک‌ها در سازه بنایی کلافدار قابل مطالعه است. نتیجه این تحلیل به‌خوبی با مودهای شکست نمونه‌های واقعی آسیب‌دیده در زلزله سرپل ذهاب منطبق بوده است.

واژگان کلیدی: رفتار لرزه‌ای، سازه بنایی کلافدار، تحلیل المان محدود، زلزله سرپل ذهاب.

۱- مقدمه

در طول بیش از صد سال گذشته، سازه‌های بنایی کلاف‌دار به‌عنوان یک فناوری ساختمانی که ویژگی‌های هر دو سازه بنایی غیرمسلح و قاب بتن مسلح را در بر دارد، مطرح شده است [۱]. بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، در ساختمان بنایی کلافدار، تمام یا قسمتی از بارهای قائم و تمامی بار جانبی در هر دو امتداد اصلی ساختمان توسط دیوارهای با مصالح بنایی غیرمسلح تحمل شود [۲]. نخستین استفاده گزارش شده از سازه بنایی کلاف‌دار به بازسازی ساختمان‌های تخریب شده در زلزله مسینای ایتالیا به سال ۱۹۰۸ (با بزرگی ۷/۲ ریشتر) برمی‌گردد [۱]. این سازه در بخش مدیترانه‌ای اروپا (ایتالیا، اسلونی، صربستان) [۱]، آمریکای لاتین (مکزیک، شیلی، پرو، آرژانتین و سایر کشورها) [۱، ۳]، خاورمیانه (ایران) [۱، ۴]، آسیای جنوبی (اندونزی) [۱] و خاور دور (چین) [۱] رواج دارد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که سازه بنایی کلاف‌دار در کشورها و مناطقی رواج یافته که دارای خطر لرزه‌ای بسیار بالا هستند [۱]. نخستین گزارش‌های مشروح، درباره عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بنایی کلاف‌دار به زلزله‌ی ۱۹۳۹ شیلی (به بزرگی ۷/۸ ریشتر) برمی‌گردد که بیش از ۵۰ درصد از تمام سازه‌های بنایی کلاف‌دار بررسی شده از هرگونه خسارت لرزه‌ای مصون ماندند [۱]. این ساختمان‌ها عملکرد رضایت‌بخشی را در زلزله‌های گذشته از خود نشان داده‌اند [۱، ۵-۷]. به‌طورکلی تجارب زلزله‌های گذشته و نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد ساختمان‌های بنایی کلافدار اگر

به‌درستی ساخته شده باشند پاسخ لرزه‌ای مناسبی نشان خواهند داد. در نتیجه جایی که مصالح بنایی به دلایل اقتصادی و سنتی به‌صورت گسترده استفاده می‌شود، یک انتخاب خوب برای نواحی لرزه‌خیز است [۱، ۵].

مطالعه رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی کلافدار در پژوهش‌های زیادی مدنظر قرار گرفته است. در ادامه برخی از جدیدترین این تحقیقات که مرتبط با پژوهش حاضر است، مرور می‌گردد. در سال ۲۰۰۹، رویز-گارسیا و نگرته [۸] برای دیوارهای بنایی کلافدار که اعضای اصلی سازه‌ای در سیستم باربر جانبی ساختمان‌های مسکونی آمریکای لاتین هستند، یک منحنی تردی بر پایه تغییر مکان نسبی ارائه کردند. این منحنی برای دو حالت عملکرد سازه‌ای و قابلیت تعمیر دیوارهای بنایی کلافدار تولید شده است. این کار بر اساس نتایج آزمایشگاهی بر روی ۱۱۸ نمونه بنایی تحت بار جانبی چرخه‌ای در طول برنامه‌های پژوهشی در مکزیک، شیلی، پرو، ونزوئلا و کلمبیا انجام شده است. منحنی‌های تردی برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های بنایی کلافدار و تخمین خسارت اقتصادی ناشی از زلزله بسیار کارآمد است [۸].

توریسی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۲، یک مطالعه پارامتری به‌منظور بررسی اثر برهم‌کنش دیوار و قاب بر اساس مدل‌های المان محدود انجام دادند. نتایج اولیه ثابت کرد که پاسخ سازه‌ای دیوار بنایی کلافدار و قاب پر شده مشابه است. ایشان یک مدل خلاقانه برای تحلیل غیرخطی سازه بنایی کلافدار و قاب پر شده بتن مسلح پیشنهاد دادند که در این مدل دیوار بنایی با استفاده از شش دستک قطری مدل‌سازی شده و مقاومت محوری دستک‌ها بر اساس یک تئوری شکست عمومی با لحاظ کردن شکست لغزشی- برشی، شکست قطری کششی و شکست فشاری تعیین گردیده است. مزیت اصلی این مدل نه‌تنها پیش‌بینی سختی و مقاومت سازه است بلکه تأثیر دیوار بنایی بر قاب پیرامونی را نیز نشان می‌دهد. همچنین این مدل در تحلیل سازه‌های بزرگ نیز به دلیل سادگی می‌تواند به کار رود [۵].

در سال ۲۰۱۳، مدیروس و همکاران [۹] بحثی را روی رفتار دیوارهای بنایی محصور و غیر محصور با انواع مختلف تسلیح افقی، زمانی که تحت نیروی افقی درون صفحه قرار می‌گیرند با استفاده از شبیه‌سازی عددی پیشرفته انجام دادند. در این مطالعه، بلوک‌های بتنی سبک که در ساختمان‌های مسکونی کوتاه تا میان‌مرتبه در مناطق لرزه‌خیز به کار می‌رود، مطالعه شده است. در این پژوهش، بلوک‌ها، ملات و عناصر اتصال‌دهنده بلوک و ملات به‌صورت یک محیط پیوسته مدل شدند. داده‌های ورودی بر اساس نتایج آزمایشگاهی بوده و نتایج هم با تأکید بر منحنی نیرو- جابه‌جایی و مودهای شکست با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است، علی‌رغم سادگی مدل ماکروی ایزوتروپیک پیشنهادی، تطابق منطقی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی دیوارهای بنایی غیر محصور در خصوص الگوی ترک و منحنی نیروی - جابه‌جایی حاصل شد. در مورد دیوارهای بنایی محصور، نتایج سختی قبل و بعد از نقطه اوج دقت کمی دارد اگرچه ترتیب الگوی ترک و مقاومت حداکثری، تطبیق خوبی دارند. در حالت وجود میلگردهای خرپایی بستر در هر دو حالت، سختی، بار نقطه اوج و الگوی ترک‌های توزیع شده به‌طور منطقی پیش‌بینی شده است [۹].

جاناراج و داناسکار [۱۰] در سال ۲۰۱۴، به مطالعه آزمایشگاهی و المان محدود رفتار برشی درون‌صفحه دیوار بنایی از بلوک بتنی مجوف که با استفاده از هسته بتن مسلح محصور گردیده است، پرداختند. در این مطالعه، مدل ماکروی دو بعدی برای شبیه‌سازی رفتار دیوار بنایی محصور به کار رفته است. برای مدل‌سازی، المان مصالح بنایی و اعضای محصورکننده با ویژگی‌های ماکروی بنایی و میلگردهای فولادی با المان خرپایی مدل شدند. مدل المان محدود، رفتارهای کلیدی مشاهده شده در آزمایش شامل مقاومت برشی، الگوی تغییر شکل و ترک دیوار بنایی غیر محصور و محصور را بازتولید کرد [۱۰].

در سال ۲۰۱۴، مارکز و لورنسو [۱۱] رفتار آزمایشگاهی سازه بنایی غیرمسلح و سازه بنایی کلافدار را با پاسخ پوش‌آور مدل‌های کامپیوتری مقایسه کردند. سپس مسکن متداول اروپای

جنوبی را که معمولاً به‌صورت بتن مسلح طراحی می‌شود با سازه بنایی غیرمسلح و سازه بنایی کلافدار در نظر گرفته و مقاومت لرزه‌ای آن را تحت حداکثر شتاب زمین به میزان g ۰/۱۵ برای سازه بنایی غیرمسلح و g ۰/۲۰ برای سازه بنایی کلافدار ارزیابی کردند. همچنین هزینه ساخت را نیز با سازه بتن مسلح مقایسه کردند. تحلیل‌های مسکن مورد مطالعه نشان داد، پاسخ‌های پوش‌آور پیش‌بینی شده برای سازه‌های بنایی، ظرفیت کافی برای مقاومت در برابر زلزله را به همراه دارد، همچنین کاهش هزینه‌ای تا ۲۵ درصد را نسبت به سازه‌های بتن مسلح فراهم می‌کنند [۱۱].

اوکایل و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶، در یک کار پژوهشی رفتار دیوارهای بنایی کلافدار را تحت بار جانبی بررسی کرده‌اند. شش دیوار با مقیاس کامل تحت ترکیبی از بار قائم و بار جانبی تا مرحله شکست آزمایش شدند. دیوارها شامل شکل‌های مختلفی به‌صورت توپر، دارای بازشو از نوع در و پنجره، دارای نسبت‌های مختلف میلگرد طولی و عرضی برای کلاف‌ها، با انواع مختلف آجر به‌صورت آجر رسی سوراخ‌دار و آجر سیمانی توپر در نظر گرفته شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که دیوارها به‌صورت عمومی بعد از شکست دستک قطری که در دیوار به دلیل تنش قطری عرضی شکل گرفته است، یک شکست برشی در انتهای کلاف‌هایی که میلگرد کمی دارند را تجربه می‌کنند. ترک‌های پله‌ای در ملات دیوار به‌صورت قطری یا اطراف بازشوها شکل می‌گیرد. یک مدل عددی با استفاده از روش المان محدود ساخته شد و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردید. این مدل برای تحلیل شکل‌های مختلفی با نسبت‌های ظاهری مختلف، نسبت‌های نیروی محوری، تعداد کلاف، اندازه و جهت بازشو به کار رفت. نتایج نشان داد مقاومت آجر و تعداد کلاف نقش مهمی در افزایش مقاومت نهایی دیوار و شکل‌پذیری ایفا می‌کند [۱۲].

در سال ۲۰۱۸، شاکرمی و همکاران [۴] با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرفته، رفتار دیوارهای بنایی کلافدار را با نسبت‌های ظاهری و تسلیح متفاوت تحت نیروهای چرخه‌ای درون‌صفحه‌ای مطالعه کردند. واحدهای بنایی شامل آجر رسی توپر و بلوک‌های سیمانی، ملات و المان‌های اتصال‌دهنده واحدها و ملات به‌صورت محیط پیوسته مدل شدند. نتایج عددی به‌صورت منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی، نوع مود شکست و شکل‌پذیری و جذب انرژی ارائه شد که نشان می‌دهد دیوار کلافدار با نسبت ظاهری، عملکرد بهتری را از لحاظ مکانیسم مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی دارد [۴].

در ادامه ابتدا کارکردهای کلاف‌های افقی و قائم و شباهت رفتار ساختمان بنایی کلافدار با قاب پر شده بررسی شده و سپس نتیجه بررسی میدانی پنج ساختمان بنایی پس از زلزله سرپل ذهاب ارائه گردیده است. در ادامه رفتار دو گونه اصلی شامل دیوار بنایی با کلاف افقی و دیوار بنایی با کلاف افقی و قائم به‌صورت المان محدود تحلیل و مودهای شکست حاصل از تحلیل المان محدود با نمونه‌های واقعی آسیب‌دیده در زلزله سرپل ذهاب مقایسه شده است. با استفاده از تحلیل خطی المان محدود به‌خوبی مسیر بار در سازه بنایی کلافدار قابل مطالعه است و بر این اساس در اغلب موارد وقوع ترک‌ها در زلزله قابل بررسی است.

۲- کارکردهای کلاف‌های افقی و قائم

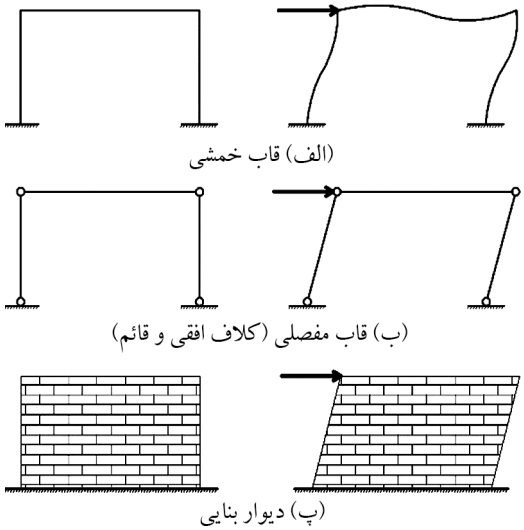
کلاف‌ها نقش مهمی در شکل‌پذیری [۴، ۱۲] و حفظ مقاومت [۱۲] دیوار بنایی کلافدار دارند. نسبت‌های تسلیح بیشتر کلاف [۴، ۱۲] و افزایش تعداد کلاف‌ها [۱۲]، ذخیره مقاومت بیشتری را برای دیوار فراهم می‌کند [۴، ۱۲] و موجب افزایش سختی جانبی دیوار می‌شود [۴]. کلاف‌های افقی و قائم موجب محصوریت دیوار شده، با ایجاد تکیه‌گاه به ترتیب در امتداد طول، لبه فوقانی و امتداد ارتفاع، لبه قائم از شکست خارج از صفحه دیوار جلوگیری می‌کنند [۱۳]. ساختمان‌های بنایی غیرمسلح اساساً برای بارهای ثقلی طراحی می‌شوند و ظرفیت نیروی درون‌صفحه‌ای آنها عموماً کافی نیست، ولی ظرفیت باربری ساختمان‌های بنایی کلافدار تا زمانی که دیوار ترک‌های شدیدی را تجربه نکند، باقی می‌ماند [۱۰]. از کارکردهای اختصاصی کلاف قائم به جلوگیری از ترک گوشه دیوارها و از کارکردهای بسیار مهم و اختصاصی کلاف افقی به انتقال بار جانبی از سقف به دیوارهای موازی جهت

زلزله و تحمل خمش درون‌صفحه دیافراگم سقف به‌صورت نیروی کششی می‌توان اشاره کرد [۱۳].

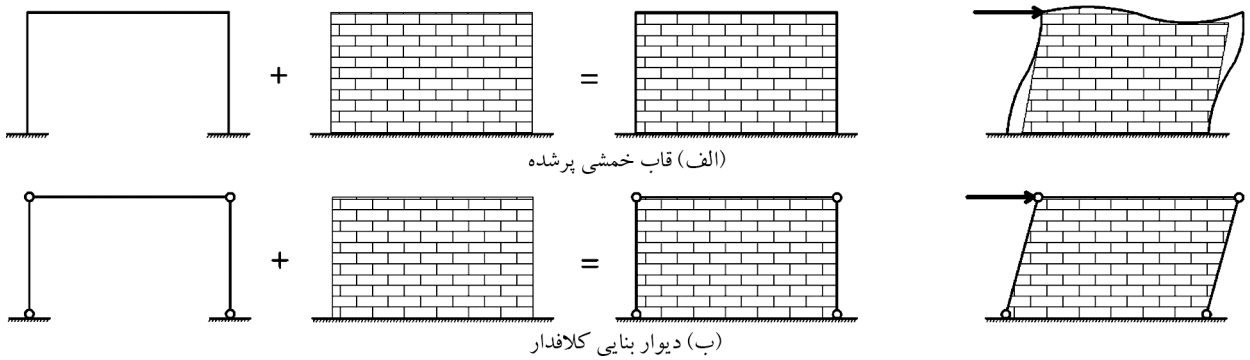
۳- شباهت رفتار ساختمان بنایی کلافدار با قاب پرشده

یک ساختمان بنایی کلاف‌دار که در برابر تکان‌های زلزله قرار می‌گیرد، می‌تواند به‌صورت یک خرپای عمودی مدل‌سازی شود. دیوارهای بنایی مانند دستک قطری عمل می‌کنند که در معرض فشار قرار دارند درحالی‌که اعضای محصورکننده‌ی بتن مسلح به‌صورت کششی یا فشاری عمل می‌کنند [۱]. سازه بنایی کلافدار و قاب پرشده علی‌رغم روش‌های ساخت متفاوت، تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای پاسخ مشابهی دارند. داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی، به‌وضوح نشان می‌دهد که هر دو سازه در مراحل اولیه دچار جدایش می‌شوند. بعد از این جدایش، دستک قطری فشاری در دیوار شکل می‌گیرد [۵]. در واقع وجود کلاف‌ها در سازه بنایی کلافدار به شکل‌گیری دستک قطری فشاری دیوار کمک می‌کند [۱۳]. با توجه به اینکه کلاف‌ها عملاً ظرفیت خمشی چندانی ندارند و سهم قابل ملاحظه بار جانبی توسط دیوارها تحمل می‌شود و عمده رفتار کلاف‌ها به‌صورت اعضای خرپایی محوری است در نتیجه در ظاهر مانند قاب دارای دیوار پرکننده، جدایی واضحی بین دیوار و قاب دیده نمی‌شود درحالی‌که جابه‌جایی قاب نسبت به جابه‌جایی سازه بنایی کلافدار بیشتر است و مجال این رخداد فراهم شده و جدایش قابل مشاهده است. در ساختمان بنایی کلافدار هم سختی سازه بسیار زیاد است، هم مود تغییر شکل کلاف فقط به‌صورت محوری طولی است، در نتیجه با توجه به تغییر شکل متوازی‌الاضلاعی شکل دیوار بنایی کلافدار، چنین جدایشی قابل مشاهده نیست. البته چسبندگی بین دیوار و کلاف قائم به حدی است که در اغلب زلزله‌های شدید نیز این جدایش اتفاق نمی‌افتد. حالت صحیح‌تر این است که مسئله به دو بخش تقسیم شود؛ بخش اول قبل از جدایش باشد که شبیه المان مرزی در دیوار برشی مدل شود و بخش دوم بعد از جدایش همانند قاب پرشده به‌صورت دستک قطری فشاری مدل شود. با توجه به اینکه در سیستم دیوار بنایی کلافدار، دیوار تحت بار ثقلی نیز قرار دارد، در نتیجه ظرفیت باربری جانبی آن بیشتر از دیوار پرکننده است و مقاومت فشاری بیشتری خواهد داشت و در نتیجه پهنای دستک معادل در دیوار بنایی کلافدار بیشتر از پهنای دستک فشاری در قاب پرشده است.

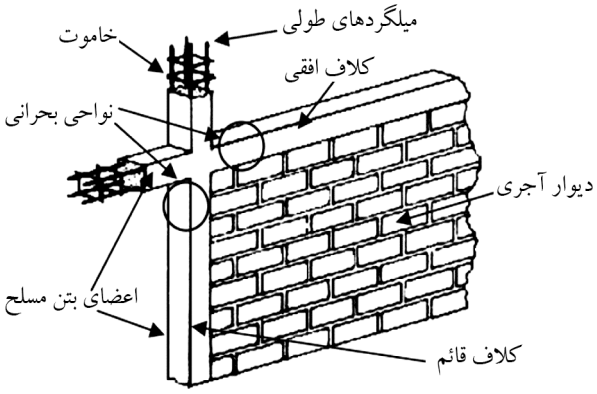
در شکل (۱) تغییر شکل جانبی قاب خمشی، قاب مفصلی که معادل سیستم کلاف‌های افقی و قائم است و عملاً به‌صورت مکانیسم می‌شود و دیوار بنایی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کلاف‌ها ظرفیت خمشی نداشته و به‌صورت متوازی‌الاضلاع تغییر شکل پیدا می‌کنند، این تغییر شکل مشابه دیوار بنایی است. در شکل (۲) دیوار بنایی به قاب خمشی و قاب مفصلی (کلاف‌های افقی و قائم) اضافه شده است. در این حالت با توجه به تغییر شکل متفاوت قاب خمشی و دیوار بنایی، عملاً یک جدایش بین دیوار و قاب مشاهده شده و تشکیل دستک قطری معادل مشهود است ولی با توجه به شباهت تغییر شکل جانبی قاب مفصلی و دیوار که هر دو به‌صورت متوازی‌الاضلاع تغییر شکل می‌دهند، عملاً جدایشی بین دیوار و قاب قابل مشاهده نیست؛ درحالی‌که مسیر بار و مشاهده اغلب خرابی‌های زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد در این حالت نیز عملاً دستک قطری فشاری تشکیل گردیده (شکل ۳) و تا حدود ۸۰ درصد رفتار دیوار محصور شده با کلاف مشابه قاب پر شده است.



شکل (۱): تغییر شکل سیستم تحت نیروی جانبی.



شکل (۲): تغییر شکل سیستم تحت نیروی جانبی.



شکل (۳): دیوار آجری محصور شده توسط کلاف به‌صورت دستک قطری عمل می‌کند [۱۳].

بررسی مودهای شکست سازه‌های بنایی کلافدار در تمام دنیا نشان می‌دهد، خردشدگی گوشه یک مود رایج است. برخی از این شکست‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. این مود شکست به‌خوبی گویای این مطلب است که یک نیروی متمرکز در گوشه‌ها وجود دارد و در نواحی مجاور بزرگی نیرو به این اندازه نیست. این مؤلفه افقی و قائم که موجب شکست گوشه شده‌اند در واقع نشان‌دهنده‌ی وجود یک مسیر بار قطری یا شکل‌گیری دستک قطری است. به‌ویژه زمانی که ملات دیوار ضعیف است، این رفتار دستک قطری معادل بیشتر قابل مشاهده است.

شکل (۴): چند نمونه از شکست کلاف قائم در اثر اندرکنش با دیوار [۱۳].

۴- پنج نمونه از ساختمان‌های بنایی پس از زلزله سرپل ذهاب

در این قسمت به‌صورت مختصر پنج نمونه از ساختمان‌های بنایی محله فولادی سرپل ذهاب پس از زلزله بررسی شده است. ساختمان‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که با توجه به موضوع مقاله حاضر دربرگیرنده کلیه حالت‌ها به شرح زیر باشد:

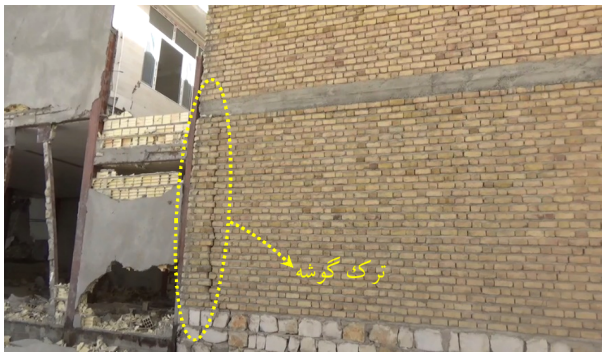
- ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی
- ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم
- ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم در طبقه اول و کلاف افقی در طبقه دوم
- ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی
- ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی و قائم

۴-۱- ساختمان شماره یک: ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی

در این ساختمان بنایی دو طبقه، کلاف قائم اجرا نشده ولی در تراز طبقه اول و دوم کلاف افقی اجرا شده است (شکل ۵). در تراز پی کرسی چینی خوبی انجام شده است ولی کلاف بندی وجود ندارد. دیواری که در امتداد طول ساختمان قرار دارد، دیوار باربر می‌باشد. در طبقه پایین که نیروی برشی بیشتری داشته است، یک ترک در مرز بین دیوار باربر و دیوار غیر باربر رخ داده است (شکل ۶). در ساختمان‌های بنایی در محل اتصال دیوار باربر به دیوار غیر باربر با یک حرکت مختصر برون‌صفحه، دو دیوار از هم جدا شده و در تمام امتداد ارتفاع دیوار ترک ایجاد می‌شود. اگر در همین ساختمان کلاف قائم وجود می‌داشت این ترک ایجاد نمی‌شد.

علاوه بر این ترک، یک ترک قطری در قسمت میانی دیوار باربر ایجاد شده است. این ترک در تمام ارتفاع دیوار از کلاف سقف طبقه اول تا روی کرسی چینی ادامه دارد. نیروی برشی ایجاد شده به‌اندازه‌ای بوده که در این دیوار که با ملات نسبتاً خوب ماسه سیمان اجرا شده است چنین ترکی ایجاد کند. این ترک در عمده طول از داخل ملات (بند افقی و قائم) عبور

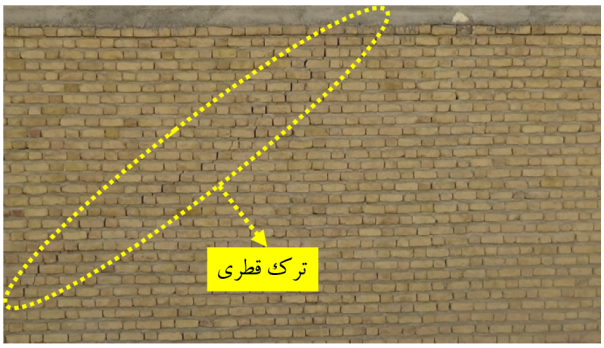
شکل (۵): ساختمان شماره یک؛ ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی در تراز سقف‌ها [۱۴].

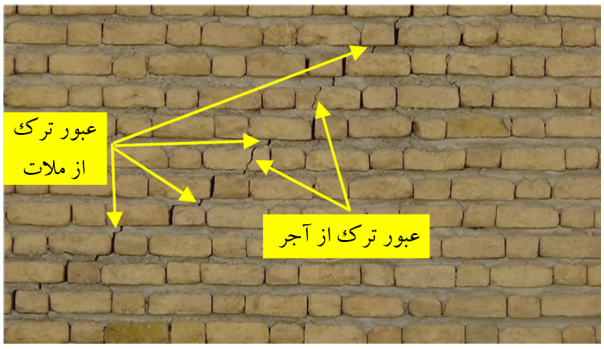


شکل (۶): ترک گوشه در دیوار باربر واقع در مرز دیوار باربر و دیوار غیر باربر.

کرده و تنها در چند نقطه از داخل آجر فشاری هم رد شده است (شکل ۷).

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ساختمان پابرجا باقی‌مانده و می‌توان گفت در مجموع برآیند رفتار ساختمان بنایی دو طبقه که در آن فقط در دو تراز سقف، کلاف افقی اجرا شده است از رفتار یک ساختمان سازه فولادی که مهاربند برون‌محور هم داشته، مطلوب‌تر بوده است (شکل ۸).





شکل (۷): یک ترک قطری در قسمت میانی دیوار باربر از کلاف زیر سقف تا روی کرسی چینی، عبور ترک قطری در عمده طول از ملات ماسه سیمان و در چند نقطه از داخل آجر فشاری.

شکل (۸): عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تر ساختمان بنایی با کلاف افقی در مقایسه با ساختمان اسکلت فولادی مجاور با مهاربند برون‌محور [۱۴].

۴-۲- ساختمان شماره دو: ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم

این ساختمان دو طبقه بوده و با سیستم بنایی کلافدار اجرا شده است (شکل ۹). کرسی‌چینی به‌صورت سنگی است و روی آن کلافی وجود ندارد (شکل ۱۰). آجرچینی دیوارها با کیفیت متوسط است و کلاف‌ها نیز بسیار معمولی و متوسط اجرا شده‌اند. نکته قابل‌توجه در این ساختمان این است که هیچ آسیب قابل‌توجه سازه‌ای ندیده است.

شکل (۹): ساختمان شماره دو: ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف‌های افقی و قائم [۱۴].

شکل (۱۰): کرسی چینی سنگی بدون کلاف افقی.

یک نکته مهم در خصوص دیوارهای ضلع جنوبی این ساختمان این است که جرزهای قابل‌ملاحظه‌ای دارد و این جرزها کاملاً سالم مانده‌اند. وجود سختی بسیار بالا در جرزها باعث ایجاد توازن مناسبی در سختی بخش شمالی و جنوبی این ساختمان شده است. همچنین وجود کلاف قائم در محل گوشه‌ها باعث انتقال مناسب نیروی جهت موازی کوچه و تحمل پیچش شده است. اگر این کلاف قائم نبود احتمال اینکه این جرزها دچار شکست قطری قابل ملاحظه بشوند وجود می‌داشت.

در خصوص لزوم اجرای کلاف افقی زیر دیوار و روی

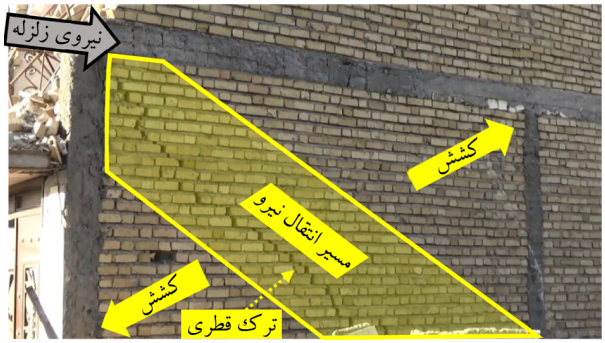
کرسی‌چینی، هرچند توصیه اکید می‌شود که برای رفتار کاملاً مناسب لرزه‌ای، چنین کلافی وجود داشته باشد ولی با توجه به رفتار دستک فشاری معادل برای دیوارها در حالتی که کلاف افقی و قائم وجود دارد، اگر کلاف روی کرسی چینی اجرا نشود نیز اختلال جدی ایجاد نمی‌شود؛ یعنی مسیر انتقال بار طوری است که با توجه به نیروی فشاری قابل ملاحظه در زیر دیوارهای طبقه پایین بر روی کرسی‌چینی، حتی بدون وجود این کلاف نیز انتقال بار جانبی، نسبتاً به‌خوبی امکان‌پذیر است. صرف‌نظر از کلاف افقی روی کرسی‌چینی، در بقیه موارد اثر کلاف افقی به‌مراتب از کلاف قائم بیشتر است. کلاف افقی، تکیه‌گاه فوقانی برای جلوگیری از شکست برون‌صفحه دیوار ایجاد کرده و با تحمل کشش در خمش درون‌صفحه دیافراگم سقف که بسیار مهم است، از فروریزش سقف جلوگیری می‌کند. با توجه به اینکه این دو نیاز مهم، در محل کلاف افقی روی کرسی‌چینی وجود ندارد در نتیجه عدم وجود آن، خطر جدی در زلزله ایجاد نمی‌کند. با این وجود، کلاف افقی روی کرسی‌چینی برای مواقعی که خاک بسیار نرم است و یا امکان اشباع شدن خاک به علت بارش فراوان یا آب‌گرفتگی وجود دارد، اهمیت فراوانی دارد زیرا با ایجاد سازوکار مناسب در نیروهای ناشی از نشست غیر یکسان، جلوی ترک‌های مورب در بخش میانی دیوار و ترک‌های قائم در بخش‌های کناری دیوار را می‌گیرد. رفتار لرزه‌ای مطلوب این ساختمان دو طبقه بنایی کلافدار نیز در مقایسه با دهها ساختمان اسکلت بتنی و فولادی که آسیب جدی دیده‌اند بسیار جالب‌توجه است (شکل ۱۱).

شکل (۱۱): عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تر ساختمان بنایی کلافدار در مقایسه با ساختمان اسکلت بتنی مجاور [۱۴].

۴-۳- ساختمان شماره سه: ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم در طبقه اول و کلاف افقی در طبقه دوم

کلاف افقی در هر دو طبقه این ساختمان بنایی اجرا شده است، در طبقه اول، کلاف قائم نیز اجرا شده ولی همه کلاف‌ها در طبقه دوم ادامه پیدا نکرده است (شکل ۱۲). البته ممکن است ضرورتی برای امتداد دادن همه کلاف‌های قائم به‌ویژه کلاف‌های میانی وجود نداشته باشد. در یکی از دهانه‌های طبقه اول، دیوار دچار ترک قطری شده ولی به‌صورت ضربدری نیست (شکل ۱۳). انتقال بار در دهانه نخست از سمت چپ به‌صورت دستک ۴۵ درجه بوده ولی در سمت راست این دستک ترک موربی رخ نداده است.

شکل (۱۲): ساختمان شماره سه: ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم در طبقه اول و کلاف افقی در طبقه دوم [۱۴].



شکل (۱۳): ترک قطری برشی دیوار در دهانه اول طبقه اول.

در همان لحظه‌ای که این نیروی شدید منجر به وقوع ترک سمت چپ شده است، ریزش دیوارهای خرپشته در طبقه فوقانی رخ داده است. به علت اجرای نامناسب امتداد دیوار در قسمت خرپشته و ادامه ندادن کلاف‌های قائم در این قسمت، خرپشته به‌طور کامل و قسمت‌های میانی راه‌پله منهدم شده است. هیچ اثری از کلاف قائم در این قسمت در تصویر مشاهده نمی‌شود. برخلاف دهانه‌های دیوار باربر طبقه همکف که به‌صورت فشار قطری نیروهای جانبی را تحمل کرده‌اند، در این طبقه دیوار در نیروی برشی درون‌صفحه قرار گرفته است. عدم انسجام دیوار در این طبقه تا خرپشته، باعث ایجاد شکست در دیوار باربر شده است. صرف‌نظر از شکست خرپشته، بقیه ساختمان عملکرد لرزه‌ای مطلوبی داشته است.

۴-۴- ساختمان شماره چهار: ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی

این ساختمان یک طبقه بنایی تنها کلاف افقی در تراز بام داشته و در تراز پی کلافی وجود ندارد. همچنین کلاف قائم نیز اجرا نشده است. لکن ساختمان رفتار مطلوبی در زلزله داشته است. نحوه اجرای تیر کنسول و اتصال آن به کلاف افقی سقف نیز مطلوب است (شکل ۱۴).

شکل (۱۴): ساختمان شماره چهار: ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی در تراز بام [۱۴].

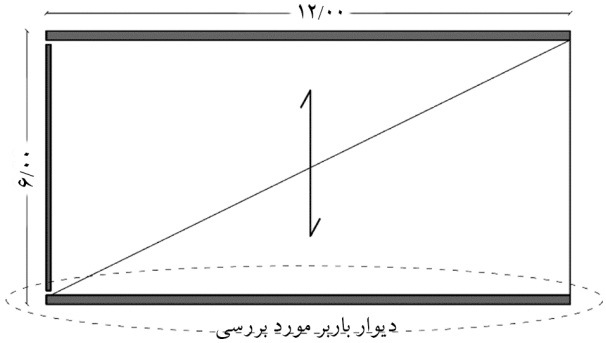
۴-۵- ساختمان شماره پنج: ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی و قائم

این ساختمان یک طبقه بنایی با کلاف افقی و قائم، عملکرد بسیار مطلوبی داشته و کاملاً سرپا باقی مانده است (شکل ۱۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تراز کف ساختمان، عایق رطوبتی اجرا شده است. لازم است توجه شود که عایق رطوبتی نباید موجب انقطاع کلاف قائم شود.

شکل (۱۵): ساختمان شماره پنج: ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی و قائم [۱۴].

۵- مشخصات مدل‌ها

در این قسمت به‌منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای ساختمان بنایی با کلاف افقی و ساختمان بنایی با کلاف قائم و افقی، دیوار باربر دو نمونه از ساختمان‌های دو طبقه با پلان ثابت ارائه شده در شکل (۱۶) در نرم‌افزار آباکوس تحت نیروهای ثقلی و جانبی وارد بر ساختمان تحلیل گردیده است. به‌طورکلی برای مدل‌سازی سازه‌های بنایی، دو روش تحلیل عددی به کار می‌رود: در رویکرد نخست تفاوتی بین واحدهای آجر و ملات نبوده و یک روش همگن‌سازی برای به دست آوردن ویژگی‌های مکانیکی مواد جدید به کار می‌رود. در واقع، تحلیل سازه بنایی با تعداد زیادی واحد و ملات می‌تواند تنها با مدلی که در آن یک رابطه بین تنش‌های متوسط و کرنش‌های متوسط در ماده کامپوزیت وجود دارد، انجام شود. در رویکرد دوم، هر دو واحدهای آجر و ملات به‌صورت جداگانه مدل شده و المان‌های اتصال‌دهنده برای مدل‌سازی ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود [۴]. با توجه به هدف اصلی مقاله می‌توان با یک مدل بسیار ساده المان محدودی، نه اینکه لزوماً رفتار لرزه‌ای را پیش‌بینی نمود بلکه رفتار لرزه‌ای رخ‌داده شده را تشریح و توجیه کرد. این روش هرچند حقیقت ندارد ولی تا ۸۰ درصد واقعیت را به‌درستی مدل می‌کند.



شکل (۱۶): پلان ساختمان مورد بررسی.

لذا دیوارها به‌صورت یکپارچه و با استفاده از المان Solid و کلاف‌های افقی و قائم نیز با استفاده از المان Solid در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. اتصال دیوارها و کلاف در مدل دارای کلاف افقی و دو سیکل اول مدل دارای کلاف افقی و قائم با استفاده از tie انجام شده است. در مدل دارای کلاف افقی و قائم، پس از شکست اتصال دیوار و کلاف قائم به دلیل افزایش تنش برشی در ناحیه اتصال، این اتصال به‌صورت اصطکاکی مدل‌سازی گردیده است. مشخصات مصالح دیوارها و کلاف‌ها به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است.

- مشخصات دیوار آجری:

$$D = 2075\,{kg}/{m^3},\ E = 2\times10^9\,Pa,\ \vartheta = 0.2,\ t = 20\ cm$$

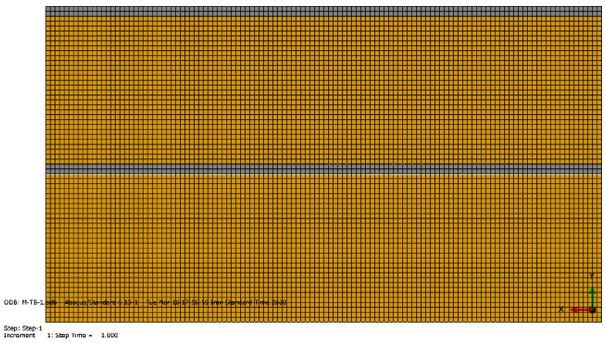
- مشخصات کلاف بتنی:

$$D = 2400\,{kg}/{m^3},\ E = 21\times10^9\,Pa,\ \vartheta = 0.2,$$
$$b = 20\ cm,\ h = 20\ cm$$

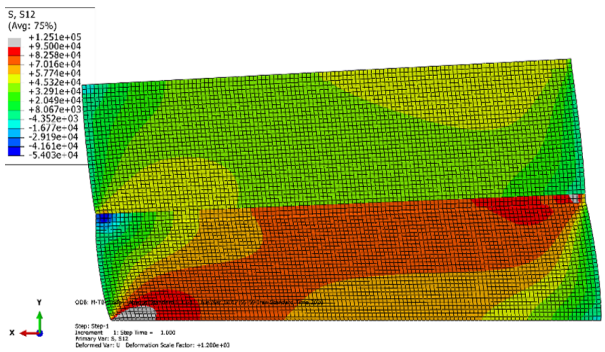
بارهای وارده به سازه بر اساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته شده است [۱۵]. با لحاظ کردن بار سقف تیرچه‌بلوک ۲۵ سانتی‌متری و جزئیات معماری مربوطه بار مرده سقف طبقات ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بام ۶۲۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. بار دیوارهای خارجی که از آجر فشاری به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر هستند با در نظر گرفتن نازک‌کاری داخلی به میزان ۴۱۵ کیلوگرم بر مترمربع است. ضریب زلزله ساختمان بر اساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ به‌صورت زیر محاسبه شده است [۱۶]. بر این اساس با فرض کاربری مسکونی بنا، زمین نوع دو و ضریب رفتار ۲، ضریب زلزله ساختمان ۰/۳۸ خواهد بود. با لحاظ کردن وزن مؤثر لرزه‌ای، نیروی زلزله وارد بر ساختمان ۶۲ تن محاسبه گردیده است که سهم دیوارهای طبقه اول ۱۲ تن و دیوارهای طبقه دوم ۱۹ تن می‌باشد.

۶- بحث روی خروجی تحلیل‌های المان محدود

در این قسمت نتایج دو مدل تحلیل شده در نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌شود. در شرایطی که تنها کلاف افقی در ساختمان بنایی وجود دارد (شکل ۱۷) و دیوار تحت بار ثقل و نیروی زلزله از راست به چپ قرار دارد، میزان تنش برشی در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مسیر بار به‌صورت قطری و در میانه دیوار است در نتیجه اولین ترک‌ها در شرایطی که نیروی زلزله تنش برشی‌ای بیش از مقاومت دیوار تحت بار ثقلی ایجاد می‌کند، در همین مسیر شکل خواهد گرفت. نمونه‌ای از این شکست در طبقه اول ساختمان شماره یک در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، ساختمان دو طبقه‌ای که در آن تنها کلاف افقی اجرا شده است.

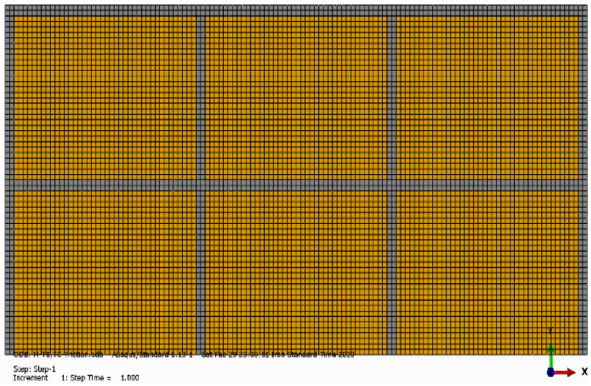


شکل (۱۷): مدل دیوار بنایی دو طبقه با کلاف افقی.



شکل (۱۸): تنش برشی در مدل دیوار بنایی دو طبقه با کلاف افقی.

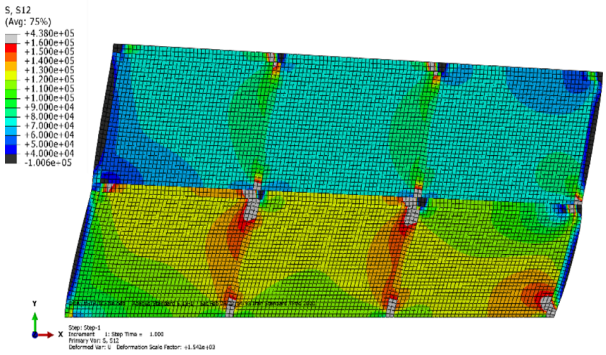
شکل (۱۹): ترک در ساختمان شماره یک؛ ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی.



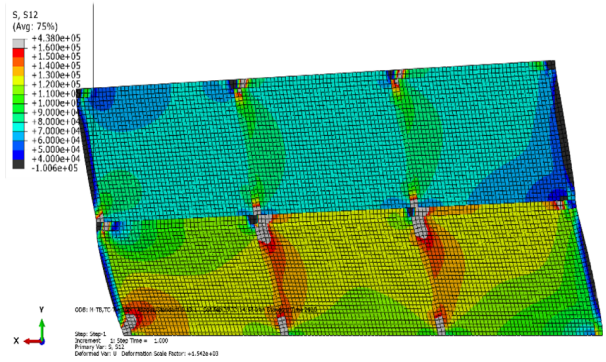
شکل (۲۰): مدل دیوار بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم.

در شرایطی که هم کلاف افقی و هم کلاف قائم در ساختمان بنایی وجود دارد (شکل ۲۰) و دیوار تحت بار ثقل و نیروی زلزله قرار می‌گیرد، شرایط متفاوت است. مطابق با مطالب ذکر شده در بخش سوم مقاله، سازه بنایی کلافدار و قاب پر شده علی‌رغم روش‌های ساخت متفاوت، تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای پاسخ مشابهی دارند، هر دو سازه در مراحل اولیه دچار جدایش شده و پس از آن، دستک قطری فشاری در دیوار شکل می‌گیرد.

در این حالت در چند سیکل اول زلزله که دیوار و کلاف از پیوستگی مطلوبی برخوردارند نحوه توزیع نیروی برشی دیوار به‌صورت شکل‌های (۲۱) و (۲۲) خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل (۲۱) که نیروی زلزله از سمت چپ به راست وارد شده است، تنش برشی در محل اتصال ضلع سمت چپ کلاف‌های قائم با ضلع سمت راست دیوارها بیشینه مقدار است



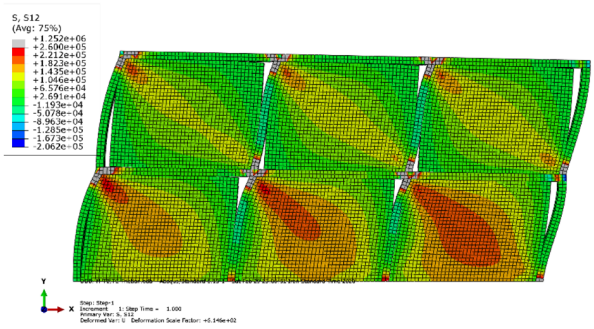
شکل (۲۱): تنش برشی در مدل دیوار بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم قبل از جدایش دیوار از کلاف- زلزله از چپ به راست.



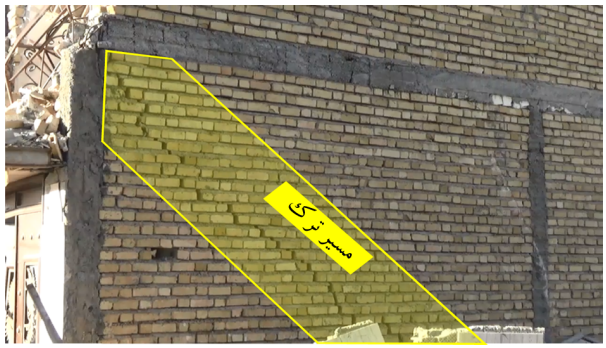
شکل (۲۲): تنش برشی در مدل دیوار بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم قبل از جدایش دیوار از کلاف - زلزله از راست به چپ.

و در نتیجه جدایش دیوار از کلاف در این محدوده رخ خواهد داد. در سیکل بعد که جهت زلزله مطابق با شکل (۲۲) از سمت راست به چپ می‌باشد، تنش برشی در محل اتصال ضلع سمت راست کلاف‌های قائم با ضلع سمت چپ دیوارها بیشینه مقدار است و در نتیجه جدایش دیوار از کلاف در این محدوده رخ می‌دهد.

این تغییر جهت زلزله منجر به جدایش دیوار از کلاف‌ها در چند سیکل اول زلزله خواهد شد. در نتیجه رفتار دیوار بنایی کلافدار مشابه قاب پرشده با دیوار در سیکل‌های بعدی خواهد شد. بر این اساس مطابق با شکل (۲۳)، مسیر بار به‌صورت قطری شکل خواهد گرفت و در نتیجه اولین ترک‌ها در دیوارهای باربر ساختمان بنایی کلافدار در این مسیر خواهد بود. نمونه‌ای از این شکست در طبقه اول ساختمان شماره سه مشاهده می‌شود (شکل ۲۴)، در طبقه همکف این ساختمان دو طبقه هم کلاف افقی و هم کلاف قائم اجرا شده است.



شکل (۲۳): تنش برشی در مدل دیوار بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم پس از جدایش دیوار از کلاف- زلزله از چپ به راست.



شکل (۲۴): ترک در ساختمان شماره سه؛ ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم در طبقه اول.

۷- نتیجه‌گیری

بررسی میدانی پنج ساختمان بنایی پس از زلزله سرپل ذهاب شامل؛ ۱- ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی، ۲- ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم، ۳- ساختمان بنایی دو طبقه با کلاف افقی و قائم در طبقه اول و کلاف افقی در طبقه دوم، ۴- ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی، ۵- ساختمان بنایی یک طبقه با کلاف افقی و قائم نشان می‌دهد رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی کلافدار در مقایسه با ده‌ها ساختمان اسکلت بتنی و فولادی که آسیب جدی دیده‌اند بسیار مطلوب‌تر بوده است.

نتایج تحلیل خطی المان محدود دو گونه اصلی از ساختمان‌های بنایی دو طبقه آسیب‌دیده در سرپل ذهاب شامل دیوار بنایی با کلاف افقی و دیوار بنایی با کلاف افقی و قائم نشان می‌دهد، در شرایطی که تنها کلاف افقی در ساختمان بنایی وجود دارد و دیوار تحت بار ثقل و نیروی زلزله قرار دارد، مسیر بار به‌صورت قطری در میانه دیوار طبقه اول شکل گرفته و در نتیجه اولین ترک‌ها در شرایطی که نیروی زلزله تنش برشی‌ای بیش از مقاومت دیوار تحت بار ثقلی ایجاد می‌کند، در همین مسیر خواهد بود. در شرایطی که هم کلاف افقی و هم کلاف قائم در ساختمان بنایی وجود دارد، بعد از چند سیکل اول زلزله، دیوار از کلاف‌ها جدا می‌شود. در نتیجه رفتار دیوار بنایی کلافدار مشابه قاب پرشده با دیوار در سیکل‌های بعدی خواهد شد. بر این اساس، مسیر بار به‌صورت قطری در چشمه‌های ما بین کلاف‌های افقی و قائم شکل خواهد گرفت و در نتیجه اولین ترک‌ها در دیوارهای باربر ساختمان بنایی کلافدار در این مسیر خواهد بود. نتیجه تحلیل‌های خطی المان محدودی انجام شده به‌خوبی با مودهای شکست رخ‌داده در زلزله سرپل ذهاب منطبق بوده و جهت تفسیر آن کاربرد دارد.

مراجع

1. Brzev, S. (2007) *Earthquake Resistant Confined Masonry Construction*. National Information Center of Earthquake Engineering (NICEE), India.
2. BHRC (2015) *Standard No 2800. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. 4th Edition, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran (in Persian).
3. Yáñez, F., Astroza, M., Holmberg, A., and Ogaz, O. (2004) Behavior of confined masonry shear walls with large openings. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 3438.
4. Shakarami, B., Kabir, M.Z., and Sistani Nezhad, R. (2018) Parametric Study on Confined Masonry Walls Subjected to In-plane Cyclic Loading through Numerical Modeling. *AUT Journal of Civil Engineering*, **2**(1), 49-58.
5. Torrisi, G.S., Crisafulli, F.J., and Pavese, A. (2012) An innovative model for the in-plane nonlinear analysis of confined masonry and infilled frame structures. *Proceedings of the 15th World*

Modes in Sarpol-e-Zahab Earthquake (Based on Understanding the Strength of Materials). Banae Danesh Publisher, Tehran, Iran (in Persian).

15. Ministry of Roads and Urban Development (2013) *Iranian National Building Code, Part 6. Design Loads for Buildings*. Islamic Republic of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
16. BHRC (2006) *Standard No 2800. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. 3rd Edition, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran (in Persian).

Conference on Earthquake Engineering, Sept, 24-28.

6. Alcocer, S.M., Arias, J.G., and Vázquez, A. (2004) Response assessment of Mexican confined masonry structures through shaking table tests. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper (No. 2130).
7. Tena-Colunga, A., Juarez-Angeles, A., and Salinas-Vallejo, V.H. (2009) Cyclic behavior of combined and confined masonry walls. *Engineering Structures*, **31**(1), 240-259.
8. Ruiz-García, J. and Negrete, M. (2009) Drift-based fragility assessment of confined masonry walls in seismic zones. *Engineering Structures*, **31**(1), 170-181.
9. Medeiros, P., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., and Gouveia, J. (2013) Numerical modelling of non-confined and confined masonry walls. *Construction and Building Materials*, **41**, 968-976.
10. Janaraj, T. and Dhanasekar, M. (2014) Finite element analysis of the in-plane shear behaviour of masonry panels confined with reinforced grouted cores. *Construction and Building Materials*, **65**, 495-506.
11. Marques, R. and Lourenço, P.B. (2014) Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis. *Engineering Structures*, **64**, 52-67.
12. Okail, H., Abdelrahman, A., Abdelkhalik, A., and Metwaly, M. (2016) Experimental and analytical investigation of the lateral load response of confined masonry walls. *HBRC Journal*, **12**(1), 33-46.
13. Tabeshpour, M.R. (2011) *Seismic Behavior of Masonry Buildings and Construction Details (Civil and Architecture)*. 2nd Edition, Fadak Issatis Publisher, Tehran, Iran (in Persian).
14. Tabeshpour, M.R. and Noorifard, A. (Under Publication) *Phenomenological Analysis of Failure*

Case Study of the Seismic Behavior of Confined Masonry Structures in the Sarpol-e Zahab Earthquake by Simplifying Finite Element Model based on Failure Modes

Mohammad Reza Tabeshpour[1] and Azadeh Noorifard[2*]

1. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2. Lecturer, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: azadeh.noorifard@ut.ac.ir

Confined masonry buildings, in which all or part of gravity loads and all of lateral loads on both main directions of the building are resisted by unreinforced masonry walls, have been widely used in Mediterranean Europe, Latin America, the Middle East, south Asia, and the Far East. Experiences obtained from past earthquakes and experimental results indicate that confined masonry buildings, if properly built, exhibits an adequate seismic response. Consequently, it represents a good choice in those seismic regions where masonry is widely used due to economical or traditional reasons.

In this paper, first, the functions of tie beam and tie column and the similarity of seismic behavior of the confined masonry walls and the filled frame have been studied. The structural response of confined masonry and infilled frames under in-plan lateral loading is similar, despite the different construction techniques. In both cases, structural separation occurs at the initial stage. After this separation, a diagonal compressive stress field is formed in the masonry. In the following, the field study of five masonry buildings after the Sarpol-e Zahab earthquake have been presented. The buildings have been selected in such a way that all types according to the scope of this research have been investigated. These types include: 1. Two-story masonry building with tie-beam, 2. Two-story masonry building with tie beam and tie column, 3. Two-story masonry building with tie beam and tie column in first story and tie beam in second story, 4. One-story masonry building with tie-beam, 5. One-story masonry building with tie beam and tie column. The results of this study show that the seismic behavior of confined masonry buildings in comparison with a lot of severely damaged buildings with steel and reinforced concrete structures, is much more desirable.

In the following, the behavior of two main types of two-story masonry building in Sarpol-e Zahab including masonry wall with tie-beam and masonry wall with tie-beam and tie-column is analyzed as finite element models in Abaqus. By using finite element linear analysis, the load path and cracks in the confined masonry walls can be studied with good accuracy. In the condition that there are only tie-beams in the building and gravity load and seismic force are applied to the wall, the maximum stress is formed in the diagonal path in the middle of the first story wall. Consequently, the first cracks will form in the same path when seismic force creates a shear stress more than shear strength of the wall under gravity load. In the condition that there are both tie-beams and tie-columns in the building, in the initial earthquake cycles, when the wall and ties have a good connection and seismic force is applied from left to right, the shear stress at the junction of the left side of the tie-columns to the right side of the walls is maximum and as a result, the walls will separate from the ties in these locations. In the next cycle, in which the direction of the earthquake is from right to left, the shear stress at the junction of the right side of the tie-columns to the left side of the walls is maximum and as a result, the walls will separate from the ties in these locations. These changes in direction of the earthquake will lead to the separation of the walls from the tie-columns in the initial earthquake cycles. Therefore, the behaviour of confined masonry wall will be similar to the infilled frame in subsequent cycles. Accordingly, the maximum shear stress path will be formed in the diagonal of the bays confined by the tie-beams and tie-columns. Consequently, the first cracks in the bearing walls of confined masonry buildings will form in this path. The results of the study show that the failure modes obtained from the finite element analyses are well matched to the actual cases damaged in the Sarpol-e Zahab earthquake.

Keywords: Seismic Behavior, Confined Masonry Structure, Finite Element Analysis, Sarpol-e Zahab Earthquake.