تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۱۹
تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۲۱

ساختمان‌های آجری کلاف‌دار به‌عنوان یک سیستم سازه‌ای اقتصادی و مقاوم در برابر زلزله

ساسان عشقی (نویسنده مسؤول)؛ دانشیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،
E-mail: s.eshghi@iiees.ac.ir

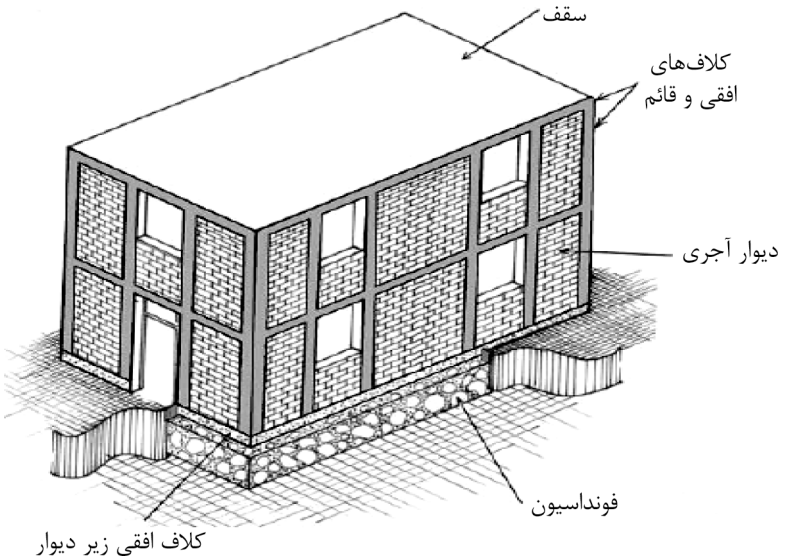
بهرنگ صرافی، دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده: *استفاده از ساختمان‌های بنایی از قرون گذشته در ایران و سایر نقاط جهان رواج داشته است. با تولد فولاد و بتن مسلح به‌عنوان مصالح اصلی سازه‌ای در طرح و اجرای ساختمان‌ها، استفاده از مصالح بنایی سنتی در ساختمان‌های با اهمیت در شهرها رو به کاهش نهاد. با این وجود، هنوز هم در بسیاری از شهرها و تقریباً اکثر مناطق روستایی، ساختمان‌های بنایی تعداد قابل‌توجهی از ساختمان‌ها را تشکیل می‌دهند که از دلایل این امر سهولت اجرا و صرفه‌ی اقتصادی آن می‌باشد؛ اما توجه به روش‌های تحلیل و طراحی این سیستم‌ها و ضوابط آیین‌نامه‌ای مربوطه متناسب با اهمیت و کاربرد آنها نبوده است. تغییرات کم در ضوابط موجود در آیین‌نامه‌ی زلزله ایران نسبت به ویرایش‌های قبلی آن و همچنین نوع ضوابط ارائه‌شده در سایر دستورالعمل‌های موجود مؤید این امر می‌باشد. در این مقاله مزایای فنی، اجرایی و اقتصادی سیستم آجری کلاف‌دار با استفاده از تحقیقات به‌عمل آمده توسط مؤلفان و دیگر پژوهشگران بررسی می‌شود. این بررسی نشان می‌دهد که این سیستم سازه‌ای علاوه بر اقتصادی بودن درصورتی‌که بر اساس ضوابط اجرا شوند، در برابر زلزله می‌توانند تا حد قابل‌قبولی مقاوم باشند. با ارتقای ضوابط فعلی آیین‌نامه زلزله ایران و اهتمام بیشتر به آموزش و اطلاع‌رسانی صحیح در زمینه‌ی عملکرد این دسته از ساختمان‌ها شاهد گسترش بیشتر استفاده از آنها خواهیم بود.*

کلیدواژه‌ها: *ساختمان‌های آجری کلاف‌دار، سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، ساختمان‌های ارزان‌قیمت*

۱– مقدمه

در صد سال اخیر ساختمان‌های آجری کلاف‌دار در کنار سیستم‌هایی نظیر آجری غیرمسلح و قاب بتنی با میانقاب آجری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ساختمان‌های آجری کلاف‌دار معمولاً در ایران از دیوارهای آجری متشکل از آجرهای رسی و ملات ماسه سیمان تشکیل شده که توسط کلاف‌های افقی و قائم از چهار طرف محصور می‌شوند. این کلاف‌ها غالباً از بتن مسلح ساخته شده‌اند. شکل (۱) عناصر تشکیل‌دهنده ی ساختمان آجری کلاف‌دار را نشان می‌دهد. عناصر اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این ساختمان‌ها دیوارهای آجری و کلاف‌های قائم و افقی در تراز سقف و فونداسیون هستند. وجود کلاف در آنها سبب افزایش یکپارچگی و پایداری دیوارهای آجری در برابر نیروهای جانبی داخل و خارج صفحه، افزایش مقاومت دیوار در برابر نیروهای جانبی و افزایش شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی آنها در برابر نیروهای زلزله می‌شوند. نکته کلیدی در عملکرد مناسب این ساختمان‌ها در برابر نیروهای جانبی، اتصال مناسب بین کلاف‌ها خصوصاً کلاف‌های قائم با دیوار آجری می‌باشد. جهت تأمین این اتصال لازم است ابتدا دیوار آجری به نحوی چیده شود که لبه‌ی کناری آن به فرم دندانه‌ای باشد.



شکل (۱): *نمونه یک ساختمان آجری کلاف‌دار و عناصر تشکیل‌دهنده آن [۱].*

پس از اتمام آجرچینی و آرماتوربندی کلاف‌های قائم، قالب بر روی وجوه داخلی و خارجی دیوار قرار گرفته، بتن‌ریزی کلاف‌ها انجام می‌شود. اجرای کلاف پس از آجرچینی و اتصال سرتاسری کلاف قائم به دیوار وجه تمایز اصلی دیوار آجری کلاف‌دار و میانقاب آجری است. به این سبب تفاوت زیادی در مودهای شکست و مقاومت جانبی بین دیوار آجری کلاف‌دار و میانقاب‌های آجری وجود دارد [۱].

بررسی اطلاعات موجود اولین کاربردهای ساختمان‌های آجری کلاف دار به بازسازی ساختمان های تخریب شده در زلزله‌ی سال ۱۹۰۸ "مسینا" در ایتالیا مربوط می‌شود. بزرگای این زلزله ۷/۲ و حداقل ۶۰،۰۰۰ نفر در آن کشته شدند [۲]. تجربه‌ی بعدی ساخت ساختمان‌های آجری کلاف‌دار به دهه سی میلادی در شیلی و پس از وقوع زلزله ۱۹۲۸ "تکلا" به بزرگای ۸ در آن کشور برمی‌گردد. در این زلزله تعداد قابل‌توجهی از ساختمان های آجری غیرمسلح فرو ریخت. خوشبختانه این ساختمان‌ها در زلزله‌ی سال ۱۹۳۹ به بزرگای ۷/۸ ریشتر که در مناطق مرکزی و جنوب کشور شیلی به وقوع پیوست، عملکرد مناسبی داشتند [۳]. ساخت ساختمان‌های آجری کلاف‌دار در مکزیک از دهه ۱۹۴۰ برای کنترل ترک‌خوردگی در دیوارها در برابر نشست در شرایط خاک نرم آغاز شد. سال‌ها بعد این سیستم در دیگر قسمت‌های زلزله‌خیز مکزیک به علت عملکرد بسیار مناسب آنها در برابر زلزله متداول شد. استفاده از این دسته از ساختمان‌ها در کلمبیا به دهه‌ی ۱۹۳۰ برمی‌گردد و هم‌اکنون نیز به‌طور گسترده‌ای برای ساخت خانه‌های یک تا پنج طبقه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

استفاده از ساختمان‌های آجری کلاف‌دار در بعضی کشورهایی که در آنها مناطقی با خطر لرزه‌خیزی بالا وجود دارد، رواج دارد. به‌عنوان‌مثال در اروپای مدیترانه‌ای (ایتالیا، اسلوونی و صربستان)، آمریکای لاتین (مکزیک، شیلی، پرو (شکل ۲)، آرژانتین و...)، خاورمیانه (ایران، هند، پاکستان)، جنوب آسیا (اندونزی) و خاور دور (چین) [۱].

سیستم آجری کلاف‌دار عموماً برای ساخت خانه‌های یک، دو و سه‌طبقه مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما استفاده از این سیستم برای ساخت ساختمان‌های بلندتر نیز معمول است. به‌عنوان نمونه در مکزیک ساخت ساختمان آجری کلاف‌دار ۶ طبقه غیرمعمول نیست؛ اما محدودیت ساخت تا ۵ طبقه در بسیاری از آیین‌نامه‌های ساختمانی برای این سازه‌ها اعمال می‌شود [۱].

روش ساخت این ساختمان‌ها در نقاط مختلف تفاوت‌هایی دارد. به‌عنوان نمونه در کشور هند نوع خاصی از ساختمان‌های بنایی کلاف‌دار با نام دهاجی دیواری (Dhajji-dewari) مرسوم

است. در این سیستم دیوارهای بنایی توسط قطعات چوبی محصور می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که پانل‌های کوچکی از دیوار بنایی تشکیل می‌دهند [۴]. همچنین در این کشور استفاده از کلاف نعل‌درگاهی رایج بوده و دستورالعمل‌ها تأکید فراوان بر استفاده از این کلاف دارند. این کلاف یک ردیف کلاف افقی در تراز نعل‌درگاه است که به کلاف‌های قائم متصل می‌گردد.

در این مقاله بعد از بررسی عملکرد ساختمان‌های بنایی کلاف‌دار در زلزله‌های گذشته ایران و جهان، مقایسه‌ای در مورد مزیت اقتصادی این سیستم ساختمانی برای ساختمان‌های کوچک و یک طبقه با انواع بتنی و فولادی انجام گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی رفتار لرزه‌ای دیوارهای یک ساختمان بنایی کلاف‌دار با معرفی نمونه‌ها و ارائه‌ی نتایج آنها در حالات مختلف دیوار با بازشو و دیوار بدون بازشو ارائه و نتیجه‌گیری شده است.

۲- عملکرد ساختمان‌های بنایی در زلزله‌های گذشته

شکل (۳)، ساختمان دانشکده علوم پزشکی جوادالائمه بم را نشان می‌دهند. این ساختمان مصالح بنایی با کلاف بتنی افقی و قائم است. سقف طبقات آن از نوع طاق ضربی می‌باشد. در اثر زلزله‌ی بم آسیب‌هایی به ساختمان اصلی وارد شده که دلایل آن ضعف اجرا و عدم رعایت جزئیات اجرایی، از جمله عدم وجود میلگردهای طولی در برخی قسمت‌های کلاف افقی، فواصل زیاد خاموت‌ها در کلاف افقی، فاصله‌ی زیاد کلاف‌های قائم در برخی نقاط تا ۷ متر است. با وجود تخریب‌های مشاهده شده، ساختمان اصلی فرو نریخته است.

شکل (۲): *عملکرد ساختمان‌های آجری کلاف‌دار در زلزله سال ۲۰۰۷ پرو، ساختمان شش طبقه بدون آسیب.*

شکل (۳): *آسیب‌دیدگی یک ساختمان آجری کلاف‌دار (دانشکده علوم پزشکی جوادالائمه) در زلزله‌ی ۲۰۰۳ بم [۵].*

ساختمان‌های آجری کلاف‌دار عملکرد رضایت بخشی را در زلزله‌های گذشته ایران از خود نشان داده‌اند. به‌طورکلی ساختمان‌هایی از این دست خسارت‌هایی را در زلزله متحمل شده‌اند ولی با این حال دسته‌ای که به‌طور مناسب طراحی و اجرا شده‌اند، توانسته‌اند خطرات زلزله را پشت سر گذارند. در کشورهایی مانند مکزیک، شیلی و پرو ساختمان‌های آجری کلاف‌دار به‌طور گسترده رواج دارد و به علت زلزله‌خیز بودن آنها، تحت زلزله‌های مختلف آزموده شده‌اند. ساختمان‌های کلاف‌دار کوتاه مرتبه عملکرد بسیار خوبی را در زلزله‌های گذشته‌ی این منطقه از خود نشان داده‌اند. این امر به‌خصوص در ساختمان‌هایی که در پلان و ارتفاع منظم بوده، سبک هستند و میزان دیوار نسبی بالایی دارند، صادق بوده و عملکرد ضعیف لرزه‌ای تنها در مواردی که نقص در اجرا، طراحی یا ضعف مصالح وجود داشته، دیده شده است. این عملکرد ضعیف در موارد حذف شدن کلاف‌های قائم، انقطاع در کلاف‌های افقی، اتصال نامناسب دیافراگم و آرایش نامناسب اجزای سازه‌ای وجود داشته است.

زلزله‌ی سال ۱۹۸۵ (Llolleo) به بزرگای ۷/۸، که مرکز آن در بخش مرکزی شیلی قرار داشت، سبب فروریزش ۶۶۰۰۰ ساختمان و تخریب ۱۲۷۰۰۰ ساختمان دیگر که اکثر آنها خشتی بودند گردید. بیش از ۸۴۰۰۰ خانه پس از زلزله مورد بررسی قرار گرفتند که ۱۳۵۰۰ عدد از آنها آجری کلاف‌دار بودند. این ساختمان‌ها یک تا چهار طبقه بودند. در میان کل این ساختمان‌ها اکثر تخریب‌ها مربوط به ساختمان‌های میان مرتبه (۳ تا ۵ طبقه) بود. حدود ۲۲ درصد ساختمان‌های آجری کلاف‌دار دچار خرابی کلی یا جزئی شدند. ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه خرابی بسیار محدودی داشتند. تنها ۲ درصد از ساختمان‌های دو طبقه تخریب شده و هیچ‌کدام از یک طبقه‌ها تخریب نشده‌اند. در مجموع تعداد زیادی (۷۶ درصد) از ساختمان‌های آجری کلاف‌دار تخریب نشدند [۳]. تخریب ساختمان‌های کلاف‌دار عموماً به علت نبود کلاف قائم در محل تقاطع دیوار یا اطراف بازشوها بوده است. این موضوع تأکید مجددی بر اهمیت وجود کلاف‌های قائم در مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌های آجری کلاف‌دار است.

کشور دیگری که سابقه‌ی طولانی در ساخت ساختمان‌های آجری کلاف‌دار دارد، مکزیک است. سیستم آجری کلاف‌دار متداول‌ترین سیستم ساخت در مکزیک است و در نقاط مرکزی کشور بسیار رایج می‌باشد. این سیستم سازه هم در فرم غیر مهندسی و هم در فرم مهندسی‌ساز آن مانند ساختمان‌های صنعتی و خانه‌هایی که تحت نظارت افراد خبره ساخته شده‌اند، رواج دارند. در مجموع ساختمان‌های آجری کلاف‌دار کوتاه و میان مرتبه (تا ۴ و ۵ طبقه) عملکرد بسیار خوبی در زلزله‌ی ۱۹۸۵ مکزیک (Guerrero-Michoacan) به بزرگای ۸ نشان داده‌اند درحالی‌که ساختمان‌های بتن مسلح در زلزله‌ی مشابه تخریب شده یا فروریخته‌اند. در زلزله‌ی سال ۱۹۹۹ مکزیک (Tehuacan) به بزرگای ۶/۵ تعداد زیادی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح (عموماً خشتی) تحت اثر زلزله واقع شده، ۱۴/۰۰۰ واحد تخریب و به‌علاوه ۲۵۰۰ واحد فروریخته‌اند. در زلزله‌ی سال ۲۰۰۳ مکزیک (Tecoman) به بزرگای ۷/۶ ساختمان‌های کلاف‌دار بسیار بهتر از ساختمان‌های غیرمسلح و خشتی عمل کردند و بخش عمده ساختمان‌های آجری کلاف‌دار بدون تخریب یا با تخریب جزئی بودند. ترک‌ها معمولاً بین دیوار آجری و عناصر محصورکننده شکل گرفتند. مواردی از خرابی در مورد ساختمان‌هایی که تعداد و آرایش عناصر محصورکننده‌ی کافی نداشتند، مشاهده شد.

در السالوادور طی دو زلزله سال ۲۰۰۱ به بزرگای ۷/۷ و ۶/۶ که سبب مرگ بیش از ۱۱۰۰ نفر شد ساختمان‌های آجری کلاف‌دار عملکرد خوبی از خود نشان دادند. در این زلزله‌ها بیش از ۱۶۰۰۰۰ یعنی حدود ۲۰ درصد خانه‌های این کشور فروریخت. ساختمان‌های آجری کلاف‌دار در السالوادور بسیار مرسوم است. بیش از ۶۰ درصد خانه‌ها به سیستم میکستو ساخته می‌شوند که نوعی ساختمان بنایی کلاف‌دار

محسوب می‌شود که کلاف‌های افقی و قائم نزدیک به هم دارد.

بیش از ۹۰ درصد سازه‌های بتنی و آجری کلاف‌دار در زلزله‌ی ۲۰۰۱ السالوادور بدون خسارت برجا ماندند و تنها ۵/۹ درصد از آنها دچار خرابی‌های قابل‌ترمیم گشتند.

۳- ساختمان‌های آجری کلاف‌دار در ایران

در این بخش ساختمان‌های آجری کلاف‌دار در ایران از دو منظر هزینه ساخت و رفتار مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- هزینه‌ی ساخت

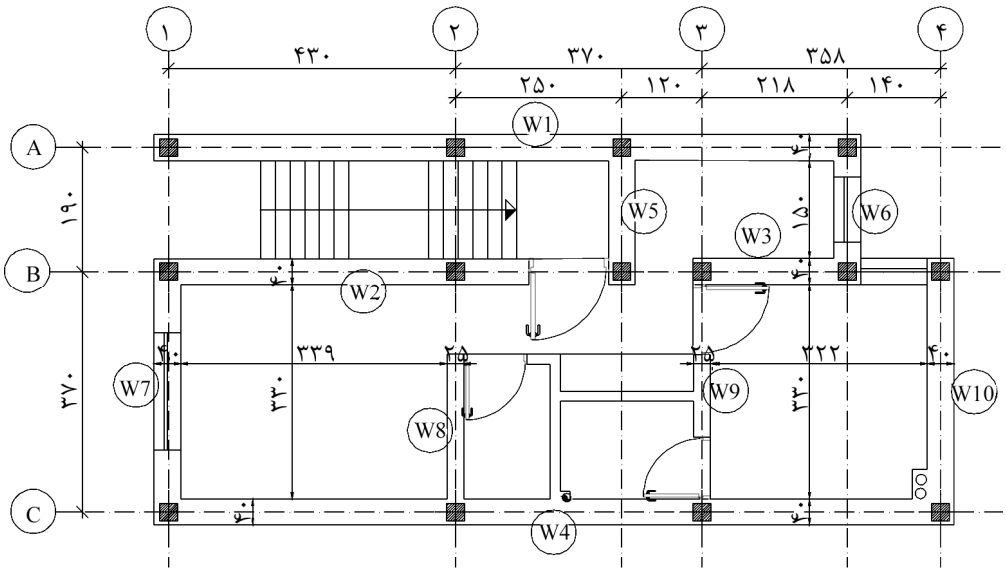
برای بررسی هزینه‌ی ساخت ساختمان‌های آجری در کشور و مقایسه آن با سایر سیستم‌ها، یک ساختمان کوچک دو طبقه در نظر گرفته شده است. این ساختمان در مساحت قابل ساخت ۶ متر در ۱۲ متر و در دو طبقه مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران و آیین‌نامه‌ی بتن ایران در دو سیستم بنایی و قاب بتنی طراحی می‌گردد. سقف از نوع تیرچه بلوک در نظر گرفته می‌شود.

شکل (۴)، پلان معماری و محل دیوارهای سازه‌ای و محل کلاف‌های افقی و قائم را که مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران تعیین شده را نشان می‌دهد. میزان دیوار نسبی در یک جهت ۶ و در جهت دیگر ۱۴/۹ درصد است. همین ساختمان با سیستم قاب بتنی بر اساس آیین‌نامه‌ی بتن ایران نیز طراحی گردید. پلان معماری و تیر ریزی طرح دوم در شکل (۵) ارائه شده است. در نهایت میزان هزینه‌ی تقریبی ساخت اسکلت و سفت‌کاری برای سه سیستم قاب بتنی، آجری و اسکلت فولادی به تفکیک فونداسیون، اسکلت و سفت‌کاری بر اساس فهرست بهای سال ۸۸ محاسبه گردیده و در جدول (۱) و شکل (۶) صرفاً جهت مقایسه با یکدیگر ارائه گردیده‌اند.

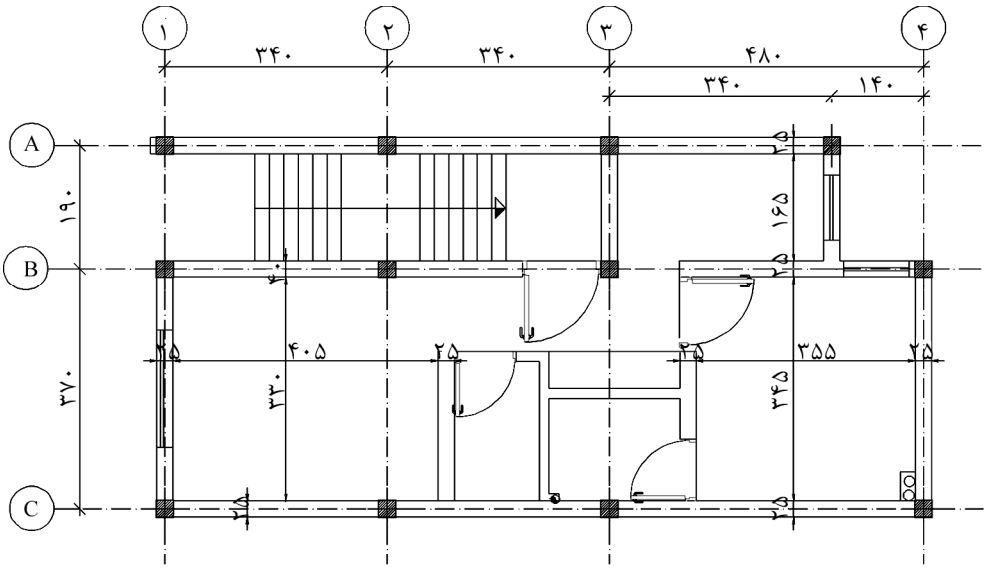
همان‌طور که مشاهده می‌شود هزینه ساخت اسکلت و سفت‌کاری طرح بتنی نزدیک به ۷۰ درصد بیشتر از طرح آجری است. این تفاوت قابل‌توجه، مزیت اصلی ساخت ساختمان‌های آجری نسبت به سیستم‌های دیگر است. به این مزیت باید سرعت و سهولت بیشتر اجرا را اضافه نمود.

جدول (۱): *مقایسه کل هزینه‌ی تقریبی اسکلت و سفت‌کاری سه سیستم (میلیون ریال)*

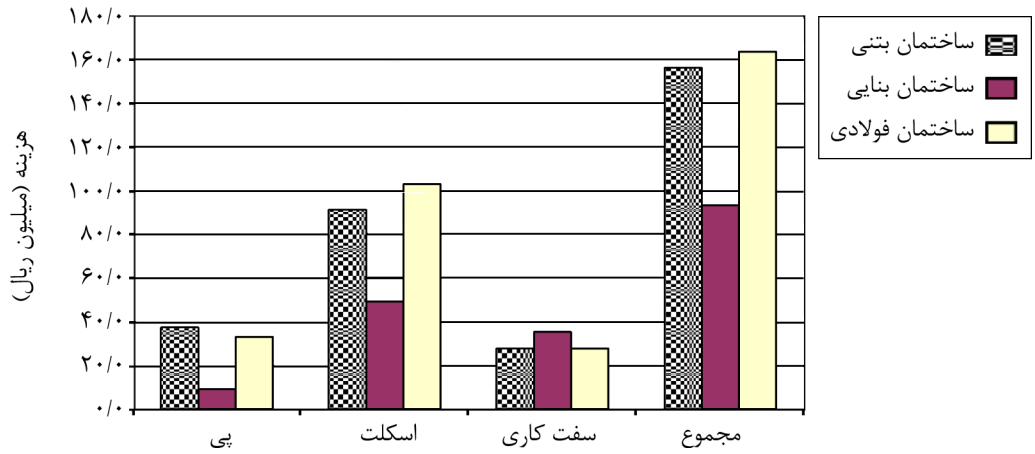
	ساختمان بتنی	ساختمان بنایی کلاف‌دار	ساختمان فولادی
پی	۳۷	۹	۳۳
اسکلت	۹۱	۴۹	۱۰۳
سفت‌کاری	۲۸	۳۵	۲۸
مجموع	**۱۵۶**	**۹۳**	**۱۶۴**



شکل (۴): *پلان طبقه اول برای طرح آجری (ابعاد به میلی‌متر می‌باشد).*



شکل (۵): *پلان طبقه اول برای طرح بتنی (ابعاد به میلی‌متر می‌باشد).*



شکل (۶): *نمودار مقایسه کل هزینه اسکلت و سفت‌کاری سه سیستم (میلیون ریال).*

۳-۲- رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های آجری کلاف‌دار

شناسایی رفتار دقیق ساختمان‌های آجری کلاف‌دار به کمک انجام آزمایش‌ها ممکن خواهد بود. تعدادی از مطالعاتی که بر روی دیوارهای آجری کلاف‌دار ساخته شده در ایران انجام شده است در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در مرجع [۶] رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ مورد مطالعه آزمایشگاهی قرارگرفته است. آزمایش‌ها بر روی چهار نمونه دیوار با مقیاس ۲:۳ انجام شده است. یک نمونه از دیوارها به‌صورت غیرمسلح به‌عنوان نمونه شاهد، یک نمونه به‌صورت مسلح و دو نمونه دیگر به‌صورت کلاف‌بندی شده مورد آزمایش قرار گرفتند. بارهای اعمالی شامل بار ثقلی دائم و بار جانبی رفت و برگشتی می‌باشد. مطالعه‌ی الگوی ترک‌خوردگی کلیه‌ی دیوارها نشان می‌دهد ضعف عمده‌ی دیوارهای آجری که متناسب و مشابه با شرایط و شیوه‌های ساخت‌وساز در کشور ساخته می‌شود کمبود مقاومت برشی در لایه‌های آجرکاری و عدم پیوستگی مناسب آجر و ملات است. بررسی رفتار چرخه‌ای دیوارها نیز گویای این واقعیت است که در دیوارهای آجری کلاف‌بندی شده، وجود کلاف‌ها باعث افزایش سختی و شکل‌پذیری دیوار می‌گردد.

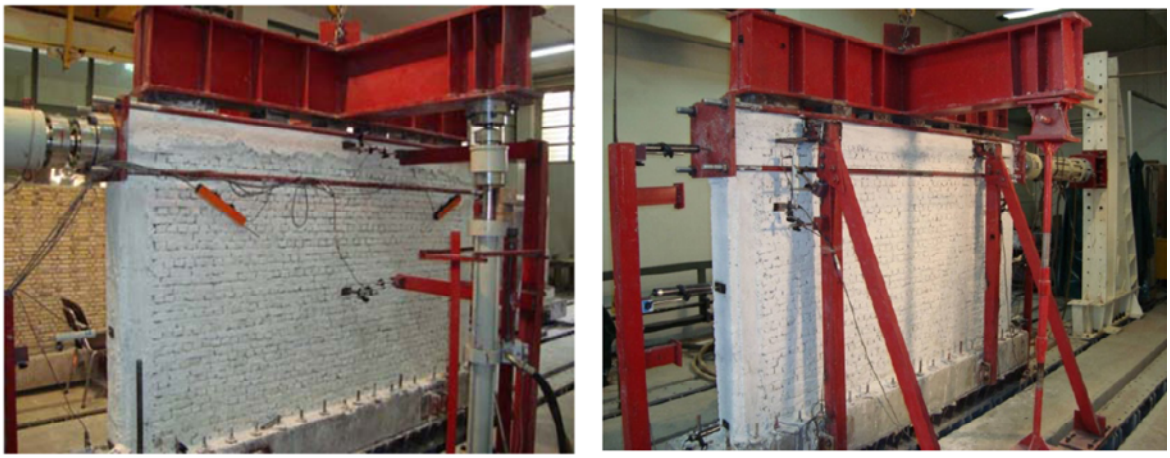
مرجع [۶] یک اتاق آجری را که در مقیاس واقعی و بر اساس توصیه‌های استاندارد ۲۸۰۰ طراحی‌شده مطابق شکل (۷) روی میز لرزان مورد آزمایش قرار می‌دهد. اتاق

شکل (۷): *نمایی از اتاق پس از انجام آزمایش [۷].*

مذکور دارای کلاف‌بندی قائم و افقی بوده، سقف آن از نوع طاق ضربی است. بازشوهایی با ابعاد متفاوت جهت بررسی اثرات اندازه، هندسه و محل آنها در اطراف اتاق منظور شده است. پس از انجام آزمایش با استفاده از روش اجزا محدود و توسط یک نرم‌افزار غیرخطی رفتار داخل صفحه و خارج صفحه دیوارهای آجری به روش استاتیکی غیرخطی تحلیل و بررسی شد. نتایج نشان داد اجرای صحیح کلاف‌بندی قائم و افقی و به‌خصوص اتصال صحیح و مناسب آنها به یکدیگر نقش اصلی را در پایداری و یکپارچگی سازه دارد. نشست زمانی دیوارهای آجری تا قبل از آزمایش و درنتیجه کاهش مقاومت اصطکاکی بین دیوار و کلاف فولادی روی دیوار، در ریزش خارج از صفحه دیوارها مؤثر تشخیص داده شد.

در مرجع [۸] با توجه به نحوه‌ی ساخت‌وساز ساختمان‌های آجری در کشور بر اساس فصل سوم استاندارد ۲۸۰۰، برخی از ضوابط اجرایی و محدوده‌های مجاز این استاندارد از جمله روش تقویت به‌وسیله‌ی کلاف‌بندی به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. یک دیوار آجری غیرمسلح و دو ساختمان آجری دو طبقه، یکی با کلاف‌بندی و دیگری بدون کلاف‌بندی با مقیاس هندسی ۱:۲ مطابق با فصل سوم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی و سپس مطابق نکات اجرایی این استاندارد و شرایط ساخت‌وساز ایران ساخته شدند. بر روی نمونه‌ها آزمایش‌های ارتعاش محیطی و بارگذاری جانبی (استاتیکی معادل سیکلی) صورت گرفت. در مطالعه‌ی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری ثقلی مشاهده شد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیل اجزای محدود همبستگی خوبی دارند. نتایج آزمایش ارتعاش محیطی نشان داد که جهت تعیین خواص دینامیکی ساختمان‌های آجری کوتاه، آزمایش ارتعاش محیطی آزمایش مناسبی نمی‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری جانبی حاکی از آن بود که کلاف‌بندی ساختمان‌های آجری، باعث مقاومت بیشتر لرزه‌ای آن می‌گردد. همچنین با افزایش شکل‌پذیری ساختمان، سازه در برابر زلزله رفتار مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد.

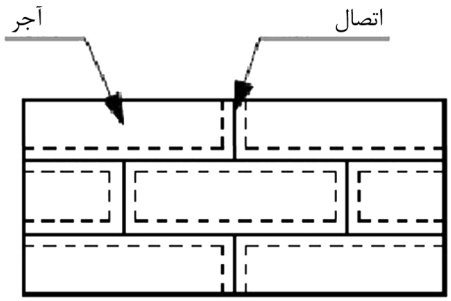
در مرجع [۹] دو نمونه دیوار آجری کلاف‌دار با مقیاس $\frac{۱}{۲}$ در آزمایشگاه سازه دانشگاه تهران مورد آزمایش چرخه‌ای تحت بار جانبی قرار گرفتند. شکل (۸) نمایی از نمونه‌ها را قبل از آزمایش نشان می‌دهد. در ساخت نمونه‌ها تلاش شده است از روش‌های ساخت معمول در ایران و ملات ضعیف استفاده شود. نسبت طول به ارتفاع دو دیوار برابر ۱/۴ و ۲ هستند. دو دیوار آجری مشابه اما بدون کلاف نیز برای مقایسه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که حضور کلاف‌های قائم شکل‌پذیری دیوارها را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. تغییر مکان نسبی دیوار کلاف‌دار ۱۰۰٪ نسبت به نمونه‌ی مشابه بدون کلاف آن افزایش داشته است درحالی‌که سختی و مقاومت تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نداشتند.



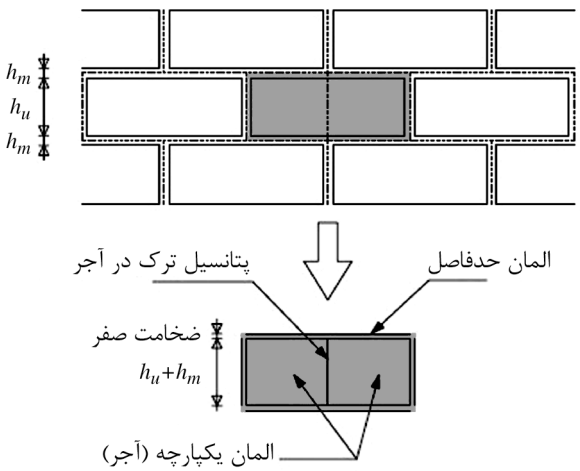
شکل (۸): *نمایی از دو نمونه دیوار آجری کلاف‌دار مورد آزمایش [۹].*

در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله دو نمونه دیوار آجری کلاف‌دار با مقیاس ۱:۲ به ابعاد ۲۰×۱۳۰×۲۰۰ سانتی‌متر و عرض کلاف ۲۰ سانتی‌متر در برابر بار جانبی مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۰]. در نهایت بدون حضور بار قائم این دو نمونه دیوار مقاومتی به میزان ۱۵۳ و ۱۳۷ کیلو نیوتن در برابر بار جانبی داشته‌اند. این مقدار مقاومت نشان می‌دهد با مصالح و عوامل موجود می‌توان به کیفیت مناسبی از ساخت دست یافت.

برای بررسی امکان مدل‌سازی و تحلیل، این دیوار توسط نرم‌افزار DIANA مدل‌سازی و تحلیل گردید. پارامترهای مدل‌سازی کلاف‌های افقی و قائم و دیوار آجری بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در مرجع [۱۰] در نظر گرفته شده و از روش مدل‌سازی میکرو ساده‌شده مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۹). در این روش ابعاد واحدهای بنایی افزایش یافته تا ضخامت ملات را نیز دربر بگیرند. واحدهای بنایی به‌صورت المان پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. رفتار درز ملات در المان حدفاصل غیر پیوسته متمرکز می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هر درز شامل ملات و دو المان حد فاصل، در یک حدفاصل متوسط تجمیع می‌شود. به این منظور برای حفظ هندسه لازم است سطح واحدها افزایش داده شوند بنابراین دیوار بنایی به‌صورت مجموعه‌ای از قطعات الاستیک که به‌وسیله‌ی خطوط دارای قابلیت لغزش و ترک‌خوردگی محصور شده‌اند در نظر گرفته می‌شود. در این روش خرابی در بندها متمرکز می‌شود ضمن آن که قابلیت ترک کششی قائم مانند شکل (۱۰) در وسط واحدهای بنایی قرار گیرد.



شکل (۹): *اجزای دیوار آجری در روش مدل‌سازی میکروی ساده شده [۱۱].*

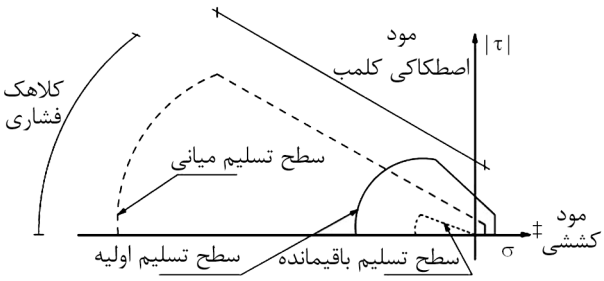


شکل (۱۰): *روش مدل‌سازی مورد استفاده [۱۱].*

با فرض اتصال سری اجزاء و توزیع یکنواخت تنش در واحد بنایی و ملات، مؤلفه‌های سختی الاستیک قائم و افقی المان حدفاصل به ترتیب به این شکل به دست می‌آیند:

$$k_n = \frac{E_u\, E_m}{h_m(E_u - E_m)} \qquad k_s = \frac{G_u\, G_m}{h_m(G_u - G_m)} \qquad (1)$$

که E_u و E_m مدول یانگ و G_u و G_m مدول برشی به ترتیب برای واحد بنایی و ملات هستند. h_m ضخامت واقعی درز ملات است. مدل رفتاری المان حدفاصل مشابه شکل (۱۱) یک کلاهک فشاری را شامل می‌شود که رفتار غیرخطی مصالح بنایی در فشار در آن متمرکز شده است. مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی دیوار آجری به شرح جدول (۲) در نظر گرفته شده‌اند.



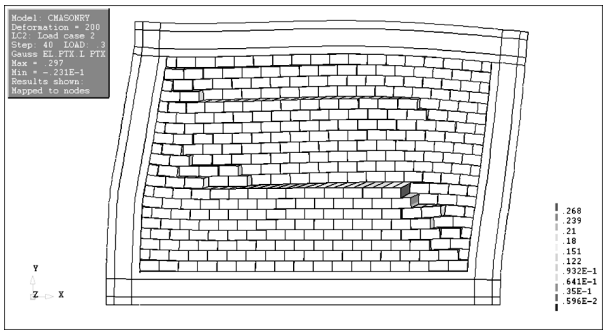
شکل (۱۱): *مدل المان حدفاصل [۱۱-۱۲].*

جدول (۲): *پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی دیوار آجری.*

بنایی	ضریب الاستیسیته	$E=3500 N/mm^2$
	ضریب پواسون	$\upsilon = 0.15$
	جرم مخصوص	$1.85\times10^{6} Kg/mm^3$
ملات	سختی عمودی خطی	$D_{11}=110\ N/mm^2$
	سختی برشی خطی	$D_{22}=50\ N/mm^2$
	مقاومت کششی	$0.25\ N/mm^2$
	چسبندگی	$0.35\ N/mm^2$
	تانژانت زاویه اصطکاک داخلی	0.75
	مقاومت فشاری	$8.5\ N/mm^2$
	انرژی شکست فشاری	$5\ N/mm$

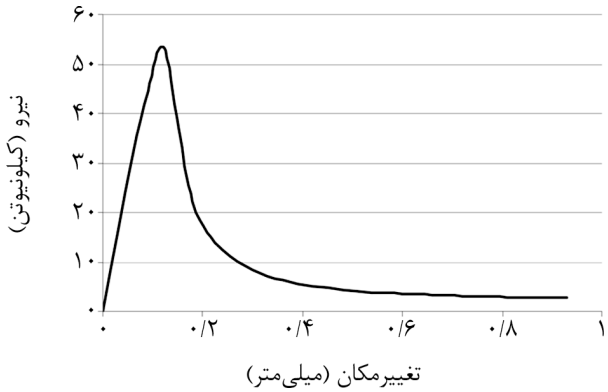
شکل (۱۲) نتیجه‌ی تحلیل را به‌صورت نمودار نیرو- تغییر مکان دیوار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان مقاومت به‌دست‌آمده نزدیکی قابل‌قبولی با نتایج آزمایش مرجع [۱۰] را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) کرنش ترک‌خوردگی را در دیوار آجری پس از آغاز ترک‌خوردگی نشان می‌دهد.

شکل (۱۲): *نمودار نیرو- تغییر مکان گره فوقانی دیوار آجری کلاف‌دار توسط DIANA .*



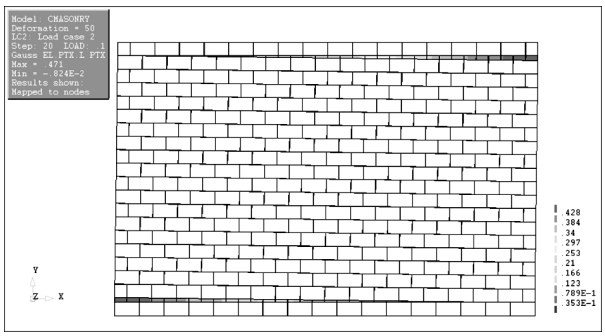
شکل (۱۳): *کرنش ترک‌خوردگی در دیوار آجری کلاف‌دار تحت بار جانبی.*

جهت مقایسه‌ی میزان تأثیر کلاف‌بندی بر رفتار دیوار آجری در برابر بارهای جانبی، دو تحلیل دیگر توسط نرم‌افزار DIANA صورت گرفت. ابتدا پانل آجری به ابعاد ۲۰×۱۳۰×۲۰۰ سانتی‌متر به‌تنهایی و بدون کلاف‌بندی در برابر بار جانبی مورد تحلیل قرار گرفت. همان‌طور که شکل (۱۴) نشان می‌دهد حداکثر مقاومت جانبی دیوار ۵۳



شکل (۱۴): *نمودار نیرو- تغییر مکان گره فوقانی پانل آجری بدون کلاف توسط DIANA .*

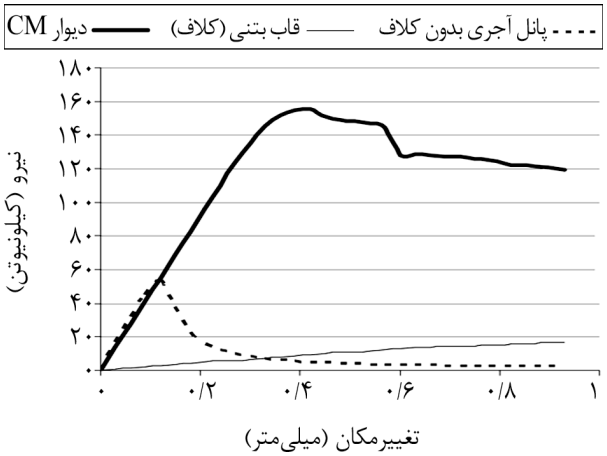
کیلو نیوتن است. شکل (۱۵) مود شکست دیوار در حالت مود گهواره‌ای را نشان می‌دهد و با توجه به اینکه دیوار جزو دسته دیوارهای لاغر محسوب نمی‌شود، می‌توان علت آن را عدم وجود بارهای سربار قائم و مقاومت کششی کم ملات دانست. شکل گسترش ترک‌ها نیز نزدیکی قابل‌قبولی با فرم گسترش ترک‌ها هنگام آزمایش دارد.



شکل (۱۵): *کرنش ترک‌خوردگی در دیوار آجری بدون کلاف تحت بار جانبی.*

در مرحله بعد قاب بتنی یا کلاف را به‌تنهایی تحت بار جانبی مورد تحلیل قرار گرفته و نتیجه آن در شکل (۱۶) با مقاومت ناچیز ۲۳ کیلو نیوتن نشان داده می‌شود. ملاحظه می‌شود که ترکیب پانل آجری و کلاف بتنی به شکل دیوار آجری کلاف‌دار، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت مجموعه دارد (شکل ۱۷) و مقاومت جانبی آن به ۱۵۵ کیلو نیوتن می‌رسد. این نتیجه با نتایج آزمایش نیز تأیید می‌گردد [۱۰].

شکل (۱۶): *نمودار نیرو- تغییر مکان گره فوقانی قاب بتنی (کلاف) توسط DIANA .*



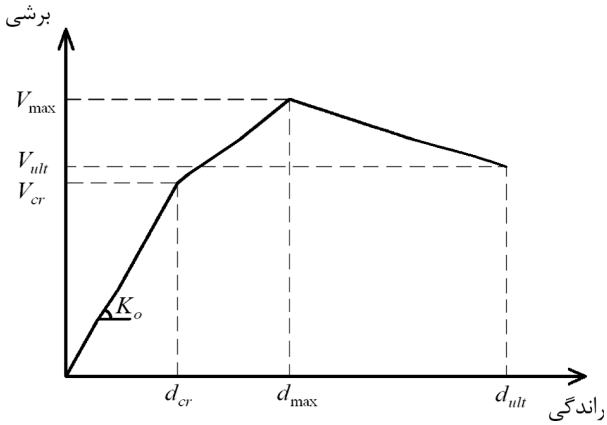
شکل (۱۷): *مقایسه نمودار نیرو- تغییر مکان پانل آجری، قاب بتنی و دیوار آجری کلاف‌دار.*

در مطالعه‌ای دیگر مؤلفین در همان آزمایشگاه، هفت نمونه از دیوار آجری کلاف‌دار در مقیاس ۱:۲ با مشخصات متفاوت را مورد آزمایش چرخه‌ای تحت بار جانبی قرار دادند. نمونه اول و دوم با اعمال بار قائم ۲ تن و بار جانبی رفت و برگشتی مورد آزمایش قرار گرفتند. در این دو نمونه سعی شده صرفاً ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ و روش‌های معمول ساخت به کار گرفته شوند. نمونه‌های بعدی با رعایت ضوابط آیین‌نامه به‌علاوه‌ی ضوابط دیگر تحت نظارت کافی ساخته شده‌اند. نمونه‌ی سوم با اعمال بار قائم ۴ تن و نمونه‌ی چهارم با اعمال بار قائم ۲ تن و بار جانبی رفت و برگشتی مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ی پنجم و هفتم با یک بازشوی پنجره و نعل درگاه معمول و نمونه‌ی ششم با یک بازشوی پنجره و نعل درگاه ممتد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [۱۳-۱۴].

برای مدل‌سازی و تحلیل این دیوار مدل‌سازی اجزا محدود به روش ماکرو [۱۱] به کار گرفته شد. در این روش مدل‌سازی، مجموعه دیوار شامل آجر و ملات به‌صورت یک جسم پیوسته در نظر گرفته می‌شود. این روش مدل‌سازی مبتنی بر روابط تحلیلی- تجربی است که بر نتایج آزمایش‌های انجام‌شده منطبق باشند. از آنجا که دانش تحلیلی در مورد رفتار مصالح بنایی محدود می‌باشد و شناسایی رفتار اجزای این مصالح تحت بارهای مختلف

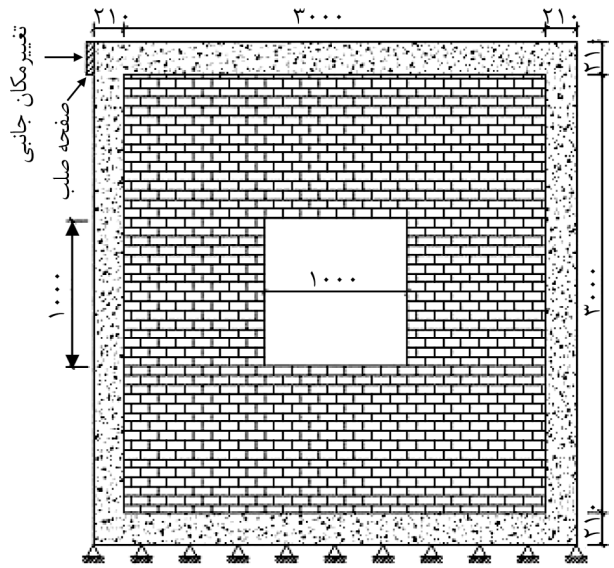
نیازمند آزمایش‌های متعدد و پرهزینه است پیروی از این روش مفید به نظر می‌رسد. این روش قادر است رفتار کلی سازه تحلیل‌شده را پیش‌بینی کند. همچنین نیروهای گسیختگی را با دقت قابل‌قبولی نشان می‌دهد؛ اما مودهای شکست موضعی را نمی‌تواند به‌دقت نشان دهد. برای به‌دست آوردن دقیق مودهای شکست موضعی اثر متقابل آجرها و ملات لازم است در مدل‌سازی منظور شود که بدین منظور مدل‌سازی میکرو ضرورت می‌یابد.

در صورت تعریف مناسب پارامترهای مدل‌سازی، مدل‌سازی ماکرو می‌تواند تخمین مناسبی از رفتار دیوارهای آجری کلاف‌دار ارائه دهد [۱۳، ۱۵]. پس از بررسی نتایج تحلیل و آزمایش‌ها نشان داده شد رفتار این دیوارهای آجری کلاف‌دار در برابر بار جانبی به‌صورت منحنی‌های سه خطی مطابق شکل (۱۸) قابل ارائه است.



***شکل (۱۸)**: مدل سه خطی پیشنهادی برای دیوارهای آجری کلاف‌دار تحت بار جانبی [۱۳].*

حالت دیگری که بسیار محتمل است، وجود بازشوی در یا پنجره در میان پانل آجری است. در این حالت سختی و مقاومت مجموعه کاهش می‌یابد. مرجع [۱۶] به مطالعه‌ی یک پانل آجری کلاف‌دار با طول و ارتفاع ۳ متر می‌پردازد که بازشویی به طول و ارتفاع یک متر در وسط آن قرار گرفته است (شکل ۱۹). این مطالعه‌ی تحلیلی نشان می‌دهد نسبت حداکثر مقاومت جانبی در حالت با بازشو به بدون بازشو در این حالت برابر ۰/۶۴ و نسبت سختی اولیه برابر ۰/۵۹ می‌باشد که اهمیت منظور نمودن بازشوها در مطالعه‌ی رفتار ساختمان‌های آجری کلاف‌دار را نشان می‌دهد. همچنین در مراجع [۱۳]، [۱۵] و [۱۷] نیز اثر بازشو بر دیوارهای آجری کلاف‌دار مورد بررسی قرار گرفته و روابطی جهت پیش‌بینی اثر آنها بر مقاومت جانبی دیوار پیشنهاد شده است.



***شکل (۱۹)**: ابعاد دیوار و بازشو مورد بررسی در مرجع [۱۶] (ابعاد به میلی‌متر هستند).*

۴- بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که نشان داده شد هزینه‌ی ساخت ساختمان‌های آجری کلاف‌دار که مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ساخته شده‌اند به میزان قابل‌توجهی کمتر از سیستم فلزی و بتنی است؛ اما به چه علت میزان ساخت‌وساز این سیستم بسیار کمتر از دو سیستم دیگر است؟ به‌عنوان نمونه در بازسازی شهر بم، کمتر از ۵ درصد ساختمان‌های نوسازی شده از سیستم آجری کلاف‌دار استفاده کرده‌اند.

از یک سیستم سازه‌ای مناسب انتظار می‌رود اقتصادی بوده و به سهولت قابل‌اجرا باشد. به این معنا که: ۱- تکنولوژی و توانایی اجرای آن در نیروهای انسانی موجود بوده؛ ۲- مصالح مورد نیاز برای ساخت آن در دسترس باشد؛ ۳- با توجه به کاربری آن سرویس مورد نیاز برای ساکنین و

استفاده‌کنندگان را فراهم نماید و ۴- در برابر بارهای ثقلی و جانبی وارده مقاوم باشد.

ساختمان‌های آجری کلاف‌دار همان‌طور که نشان داده شد نسبت به سیستم‌های فلزی و بتنی مسلح ارزان‌تر تمام می‌شوند. بررسی مهارت شاغلین در بخش ساخت‌وساز نشان می‌دهد توانایی و مهارت ساخت ساختمان‌های آجری در گروه‌های اجرایی کشورمان به‌خوبی موجود است. به‌عنوان نمونه می‌توان به اجرای سقف‌های طاق ضربی در ایران اشاره نمود. اساساً این مصالح از سال‌های دور در ایران رواج داشته است؛ لذا هم مصالح مورد نیاز و هم نیروی متخصص در اکثر نقاط کشور در دسترس هستند.

همان‌طور که بررسی عملکرد ساختمان‌های آجری کلاف‌دار نشان داد درصورتی‌که این ساختمان‌ها با رعایت اصول ساخته شوند رفتار مناسبی در برابر نیروهای جانبی از خود نشان می‌دهند و قادرند سطح عملکرد مورد نظر را تأمین کنند. از نظر سرویس‌دهی به استفاده‌کنندگان، در ساختمان‌های بنایی این محدودیت وجود دارد که ابعاد و محل بازشوها دارای محدودیت هستند و مانند تیغه در ساختمان‌های بتنی و فلزی امکان تغییرات زیاد و جابه‌جایی در دیوارهای باربر وجود ندارد. مقدار زیادی از این محدودیت به ضوابط بسیار سخت‌گیرانه‌ی آیین‌نامه‌ای بر می‌گردد که قابلیت انعطاف لازم را ندارند. این نقیصه با تغییراتی در آیین‌نامه و ضوابط آن و همسو شدن با آیین‌نامه‌های روز دنیا در زمینه ساختمان‌های آجری کلاف‌دار کاهش می‌یابد؛ اما به دلیل ماهیت عناصر مقاوم در این سیستم که دیوارهای آجری هستند این مشکل به‌طور کامل مرتفع نخواهد شد و در هر حال ساختمان‌های آجری از نظر معماری انعطاف‌پذیری ساختمان‌های بتنی یا فلزی را نخواهند داشت. در حال حاضر ضوابط سخت‌گیرانه‌ی آیین‌نامه‌ای ایران این مسئله را به حد زیادی تشدید می‌کند.

درنهایت می‌توان مسائل موجود را تحت عناوین زیر دسته‌بندی کرد:

۱- ضوابط آیین‌نامه‌ای تعداد طبقات ساختمان آجری را به دو طبقه محدود نموده‌اند، درحالی‌که در مکزیک این سیستم برای ساخت‌وساز تا شش طبقه هم مورد استفاده قرار می‌گیرد و در زلزله‌های گذشته نیز عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند؛ اما این نمی‌تواند تنها دلیل عدم استفاده از آنها باشد؛ زیرا در بسیاری از مناطق روستایی کشور، ساختمان‌های تا دو طبقه نیز با اسکلت فلزی یا بتنی ساخته می‌شوند.

۲- ضوابط طراحی ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ها بسیار سخت‌گیرانه و غیرقابل‌انعطاف هستند؛ به‌گونه‌ای که طرح نهایی شامل تیغه‌ها و دیوارهای زیاد و ضخیم و دارای بازشوهای کوچک و محدود است.

۳- در صورت نیاز ساکنین به تغییر محل تیغه‌های داخلی، این امکان در بسیاری از موارد به دلیل باربر بودن دیوارها به‌سختی امکان‌پذیر بوده یا غیرممکن است.

۴- مشکل دیگر در راه استفاده از این سیستم، اعتماد کم مهندسان به آن است که از عدم اطلاع کافی از خصوصیات و عملکرد ساختمان‌های آجری ناشی می‌شود. در جستجوی علت این کم‌اطلاعی کافی است به دروس دوره دانشگاهی مراجعه شود که نشان می‌دهد تقریباً مبحث مذکور از آموزش‌های این دوره حذف شده است.

با رفع موانع فوق یعنی با آموزش و اطلاع‌رسانی در مورد عملکرد و خصوصیات سیستم آجری و ارتقاء آیین‌نامه‌ها به‌طور طبیعی مزایای بارز این سیستم سبب خواهد شد جایگاه خود را در ساخت‌وساز کشور باز یابد و عده‌ی زیادی از مزایای آن به‌عنوان سیستمی ارزان و ایمن بهره‌مند گردند.

جهت اصلاح آیین‌نامه‌ها توجه به این نکته حائز اهمیت است که امروزه آیین‌نامه‌های پیشرفته‌ای برای طراحی ساختمان‌های آجری کلاف‌دار وجود دارند که از آن جمله می‌توان به آیین‌نامه‌ی مکزیک (NTCM-2004) اشاره نمود. ضوابط ارائه شده این امکان را برای طراح فراهم می‌کند تا طراحی را بر اساس شرایط موجود انجام دهد. ساختمان‌های بلند را با استفاده از این سیستم طرح کند، به‌صورت کمی، نه با ضوابط کلی مقاومت سازه را تخمین بزند و با تعداد دیوارهای

کمتر و بازشوهای مناسب عملکرد مناسبی را نیز از سازه به دست آورد؛ اما ساختمان‌های آجری کلاف‌دار که در ایران ساخته می‌شوند نسبت به سیستم مشابه در سایر نقاط جهان دارای تفاوت‌هایی هستند که به دلیل متفاوت بودن روش ساخت، جنس مصالح و جزئیات اجرایی به وجود می‌آیند؛ بنابراین قادر نخواهیم بود مستقیماً معیارهای پذیرش و پارامترهای مدل‌سازی حاصل از سایر مطالعات را مورد استفاده قرار دهیم. برای تطبیق نتایج مطالعات سایرین با شرایط موجود در ایران لازم است مطالعات تکمیلی انجام شود تا بتوان معیارهای پذیرش دیوارهای آجری کلاف‌دار و پارامترهای مدل‌سازی آنها را به دست آورد و مشکلات پیش رو در ساخت این سیستم اقتصادی را به حد زیادی کاهش داد.

مراجع

1. Blondet, M. (2005) *Construction and Maintenance of Masonry Houses – For Masons and Craftsmen*. Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima, Peru.

2. Billi, A., Funiciello, R., Minelli, L., Faccenna, C., Neri, G., Orecchio, B., and Presti, D. (2008) On the cause of the 1908 Messina tsunami, Southern Italy. *Geophysical Research Letters*, **35**, doi:10.1029/2008GL033251.

3. Moroni, M.O., Astroza, M., and Acevedo, C. (2004) Performance and seismic vulnerability of masonry housing types used in Chile. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, **18**(3), 173-179.

4. Rai, Durgish C. and Murty, C.V.R. (2005) *Preliminary Report on the 2005 North Kashmir Earthquake of October 8, 2005*. Indian Institute of Technology, Kanpur, India, NICEE.

۵. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان کرمان، معاونت فنی (۱۳۸۲) ستاد بررسی علل تخریب ساختمان‌های عمومی و دولتی.

۶. تسنیمی، عباسعلی (۱۳۸۳) رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰. *نشریه شماره گ-۴۰۴*، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی، تهران.

۷. حسین‌زاده اصل، مسعود و کاظمی، محمدتقی (۱۳۸۵) بررسی رفتار لرزه‌ای اتاق آجری ساخته‌شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به کمک میز لرزان و مدلسازی عددی آن. *مجموعه مقالات هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران*، دانشگاه تربیت مدرس.

۸. حاج اسماعیلی، مهدی (۱۳۸۰) *مطالعه آزمایشگاهی رفتار ساختمان‌های آجری تحت بارگذاری جانبی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

9. Khanmohammadi, M., Nahvinia, M.A., Marefat, M.S., and Behnam, H. (2011) Experimental investigation of cyclic behavior of confined masonry walls with weak shear strength. *Proc. of 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6)*.

۱۰. پورآذین، خشایار (۱۳۸۷) *بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های آجری با کلاف ساخته شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه زلزله ایران (ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰)*. پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

11. Lourenco, P.B. (1996) *Computational Strategies for Masonry Structures*. Delft University Press, Delft.

12. *DIANA* (2005) *Finite Element Analysis, User's Manual Release 9-Material Library*. TNO DIANA BV.

۱۳. صرافی، بهرنگ (۱۳۹۱) *مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی ساختمان‌های آجری کلاف‌دار*. پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

14. Sarrafi, B. and Eshghi, S. (2012) Behavior of clay brick confined masonry walls under cyclic loads. *The Masonry Society (TMS)*

Journal, **30**(1).

۱۵. عشقی، ساسان و صرافی، بهرنگ (۱۳۹۳). مدل‌سازی اجزا محدود دیوارهای آجری کلاف‌دار ساخته‌شده بر اساس آیین‌نامه زلزله ایران. *مجله علمی* پژوهشی شریف، دوره ۲-۳۰، شماره ۱ و ۲، ۴۳-۵۱.

16. Eshghi, S. and Pourazin, K. (2009) In-plane behavior of confined masonry walls –with and without opening. *International Journal of Civil Engineering*, **7**(1), 49-60.

17. Sarrafi, B. and Eshghi, S. (2014) Effect of openings on lateral stiffness and strength of confined masonry walls. *Scientia Iranica Journal*, **21**(3), 457-468.