

# بررسی رفتار لرزه‌ی اتاق آجری محصور با کلاف

محمدتقی کاظمی (دانشیار)

مسعود حسین‌زاده‌اصل (دانشجوی دکتری)

علی بخشی (استادیار)

فیاض رحیم‌زاده‌رفوئی (استاد)

مرکز تحقیقات مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی شریف

ثریا اقبالی (کارشناس)

آزمایشگاه میز لرزان، دانشگاه صنعتی شریف

kazemi@sharif.edu  
hoseinzadeh.m@gmail.com  
bakhshi@sharif.edu  
rofooei@sharif.edu  
sorayaegh@yahoo.com

یک اتاق آجری در مقیاس کامل و براساس ضوابط استاندارد  $28^\circ$ ، طراحی و بر روی میز لرزان مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه صنعتی شریف ساخته شد. بازشوهای با ابعاد متفاوت برای بررسی اثرات اندازه، هندسه و محل آنها در اطراف اتاق مذکور که دارای کلاف‌بندی قائم بتنی وافقی فولادی بوده و سقف آن از نوع طاق ضربی است، منظور شد. اتاق بر روی میز لرزان مورد آزمایش‌های لرزه‌ی و اعمال رکوردهای متناسب با رکوردهای زلزله‌های بم، طیس، ال‌سنتر و نیز هارمونیک با دامنه‌ی فزاینده قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد اجرای صحیح کلاف‌بندی قائم وافقی، به‌خصوص اتصال صحیح و مناسب آنها به یکدیگر، در پایداری و یک‌پارچگی سازه نقش اصلی را دارد. نشست زمانی دیوارهای آجری تا قبل از آزمایش و در نتیجه کاهش مقاومت اصطکاکی بین دیوار و کلاف فلزی روی دیوار، در ریزش به خارج از صفحه‌ی دیوارها مؤثر تشخیص داده شد.

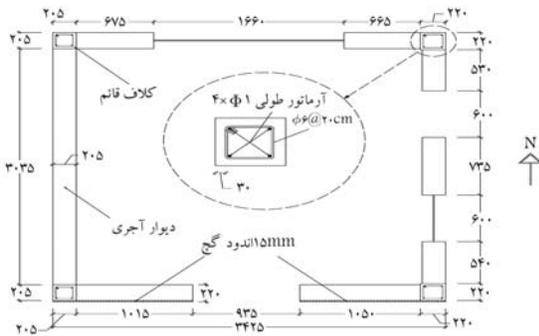
واژگان کلیدی: میز لرزان، ساختمان آجری محصور، کلاف افقی، کلاف قائم، بازشو.

## ۱. مقدمه

ساختمان‌های آجری ارائه کردند<sup>[۱]</sup> و عده‌ی برای ارزیابی لرزه‌ی ساختمان‌های بنایی رایج در کشور، دستورالعملی را تدوین کردند.<sup>[۱]</sup> در دستورالعمل‌های سازمان مرکز مدیریت بحران آمریکا (FEMA) روش‌هایی برای ارزیابی و برآورد مقاومت سازه‌های با مصالح بنایی و شیوه‌هایی برای مقاوم‌سازی و به‌سازی آنها ارائه شده است.<sup>[۱][۲]</sup> در زمینه‌ی مدل‌سازی عددی رفتار دیوارهای آجری نیز فعالیت‌های قابل توجهی انجام شده است. به‌منظور مدل‌سازی غیرخطی دیوارهای آجری یک ریزمدل ارائه شده<sup>[۳]</sup> و همچنین برای دست‌یابی به مقاومت ترک‌خوردگی و مسیر ترک در دیوار آجری با استفاده از نتایج اجزاء محدود کشسان روشی پیشنهاد شده است.<sup>[۴]</sup> دیگر محققین نیز با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بر روی سازه‌های بنایی محصور، روشی برای مدل‌سازی رفتار لرزه‌ی دیوارهای بنایی محصور ارائه کردند.<sup>[۵]</sup>

پیچیدگی رفتار این نوع سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی موجب شده که با روش‌های معمول نتوان اطلاعات دقیقی از رفتار آنها به دست آورد. برای این منظور مطالعات آزمایشگاهی در شناخت دقیق‌تر و صحیح‌تر رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های آجری مؤثر است. در این میان آزمایش توسط میز لرزان به‌منظور مطالعه‌ی مستقیم رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های آجری روشی کارآمد ولی پرهزینه است. در این رابطه پس از تکمیل ساخت میز لرزان مرکز تحقیقات مهندسی زلزله در دانشگاه صنعتی شریف، یک اتاق آجری با ابعاد واقعی طراحی و بر روی میز لرزان بنا شد. میز لرزان

تلفات زیاد انسانی و اقتصادی زلزله‌های چند دهه‌ی اخیر، نیاز به پژوهش گسترده برای بهبود طراحی و اجرای انواع سازه‌ها را ضروری ساخته است. در این میان، توجه محققین به ساختمان‌های آجری -- به‌عنوان یکی از رایج‌ترین گونه‌های ساخت در کشور -- در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از زلزله‌ی ۱۳۶۹ منجیل، افزایش قابل توجهی یافته است.<sup>[۱]</sup> از این میان عده‌ای به انجام آزمایش پرداخته‌اند و عده‌ی دیگر مدل‌سازی عددی دیوارهای آجری و اجزاء آنها را مورد بررسی قرار داده‌اند. برخی از آنان نقش جزیره‌ها در رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های آجری را از طریق مطالعه‌ی آزمایشگاهی یک نمونه‌ی ۲ طبقه مورد بررسی قرار دادند<sup>[۲]</sup> و برخی دیگر با انجام آزمایش بر روی ۴ نمونه دیوار با مقیاس دوسوم، دیوارهای برابر آجری ساخته شده براساس ضوابط استاندارد  $28^\circ$  را، تحت بارگذاری جانبی رفت و برگشتی، مورد مطالعه قرار دادند.<sup>[۳]</sup> در رابطه با رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های بنایی، محققین یک کار آزمایشگاهی پرحجم بر روی ۲۴ مدل از خانه‌های ۲ طبقه، توسط میز لرزان، انجام دادند.<sup>[۴]</sup> در تحقیقی دیگر، به‌منظور بررسی و تعیین بیشترین شدت زلزله‌ی قابل تحمل برای خانه‌های ۱ طبقه با مصالح بنایی، از سوی مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه برکلی در کالیفرنیا<sup>[۵]</sup> یک سری آزمایش بر روی ۴ خانه از این نوع و بر روی میز لرزان انجام شد. درمورد روش‌های طراحی، آنالیز و مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی، دستورالعمل‌ها و راهنماهای مختلفی تدوین شده است.<sup>[۶][۷]</sup> برخی نتایج مطالعات خود را در قالب روش‌هایی برای طراحی لرزه‌ی



شکل ۱. پلان اتاق آجری (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر).



شکل ۲. نمای جنوبی و شرقی سازه.

آجری همراه با ملات گچ و خاک پر شد. دو تیرچه‌ی IPE120 بر روی دیوارهای شمالی و جنوبی، که نقش کلاف افقی را نیز داشتند، به منظور تکیه‌گاه تیرچه‌های طاق ضربی مورد استفاده قرار گرفتند. تمام تیرچه‌ها و کلاف فولادی روی دیوارها هم‌تراز اجرا شدند و برای اتصال آنها از نبشی  $4 \times 4 \times 40$  استفاده شد. تیرچه‌های دو دهانه‌ی انتهایی توسط دو میلگرد  $\phi 10$  در دو نقطه‌ی میانی به یکدیگر وصل شدند. همچنین کل پوشش به صورت ضربدری توسط دو میلگرد  $\phi 10$  مهار شد.

#### ۴. بازشوها

ابعاد بازشو و محل قرارگیری آن، تأثیر قابل ملاحظه‌ی بر سختی، مقاومت و رفتار لرزه‌ی دیوار دارد. برای بررسی تأثیر اندازه، هندسه و محل بازشو بر رفتار اتاق، بازشوهایی با ابعاد متفاوت و براساس محدودیت‌های استاندارد ۲۸۰۰ در طرح اتاق منظور شدند. اتاق دارای چهار بازشو در ۳ جهت مختلف است. برای نمای شرقی ۲ بازشو هرکدام به ابعاد (ارتفاع  $\times$  طول)  $1065 \times 600$  در نظر گرفته شد (شکل ۳ الف). نمای شمالی دارای یک بازشو به ابعاد  $1230 \times 1660$  (شکل ۳ ب)، و نمای جنوبی نیز دارای یک بازشو به ابعاد  $1820 \times 935$  به عنوان درب ورودی است (شکل ۴) نمای غربی اتاق فاقد بازشو است. در شکل‌های ۳ و ۴ موقعیت و اندازه‌ی بازشوها و نعل درگاهی‌ها نیز مشاهده می‌شود.

نعل درگاهی بازشوی دیوار جنوبی به صورت جفت نبشی ( $6 \times 60 \times 2760$ ) در نظر گرفته شده و نعل درگاهی بازشوی دیوار شمالی IPE100 است. طول تکیه‌گاه این نعل درگاهی‌ها در داخل دیوار  $200$  mm است. بازشوی دیوار شرقی به این علت که تا زیر سقف ادامه دارند فاقد نعل درگاهی هستند. در بازشوی ضلع

تحت برخی حرکات متناسب با زلزله‌های ال‌سترو، طیس، بم و همچنین شتاب افزایشده قرار داده شد و رفتار قسمت‌های مختلف اتاق مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۲. میز لرزان دانشگاه صنعتی شریف

میز لرزان دانشگاه صنعتی شریف وسیله‌ی پیشرفته با تجهیزات به روز است که امکان شبیه‌سازی دینامیکی آزمایش‌های تجربی را بر روی مدل‌های مختلف سازه‌ی و تجهیزات حساس غیرسازه‌ی فراهم می‌سازد. تجهیزات بسیار دقیق این آزمایشگاه امکان شبیه‌سازی حرکت دوسویه‌ی افقی اغلب زلزله‌های واقعی ثبت شده، یا حرکات مصنوعی تولید شده را فراهم می‌سازد. عرشه‌ی فولادی میز دارای ابعاد  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  و ضخامت  $650 \text{ mm}$  بوده و بر روی یک چهارپایه مفصلی - لولایی نصب شده است که سه درجه آزادی در جهات x، y و چرخش حول z را میسر می‌سازد. در جهت شمالی - جنوبی، میز دارای بیشترین دامنه‌ی جابه‌جایی  $250 \text{ mm}$  ( $\pm 125 \text{ mm}$ )، بیشترین فرکانس بارگذاری  $5 \text{ Hz}$ ، سرعت بیشینه‌ی  $5 \text{ m/sec}$  و شتاب بیشینه‌ی  $3 \text{ m/sec}^2$  است. در جهت غربی - شرقی نیز میز دارای بیشترین دامنه‌ی جابه‌جایی  $400 \text{ mm}$  ( $\pm 200 \text{ mm}$ )، بیشترین فرکانس بارگذاری  $5 \text{ Hz}$ ، سرعت بیشینه‌ی  $8 \text{ m/sec}$  و شتاب بیشینه‌ی  $4 \text{ m/sec}^2$  است.

#### ۳. طراحی و ساخت اتاق آجری بر روی میز لرزان

منظور از «ساختمان با مصالح بنایی» سازه‌هایی است که با آجر، بلوک سیمانی و یا سنگ ساخته می‌شوند و در آنها تمام یا قسمتی از بارهای قائم توسط دیوارهای با مصالح بنایی تحمل می‌شود. به منظور بررسی رفتار ساختمان‌های آجری محصور شده با کلاف، ساخته شده براساس فصل سوم استاندارد ۲۸۰۰<sup>[۱۶]</sup>، یک اتاق آجری با کلاف‌بندی قائم و افقی و با توجه به محدودیت‌های میز لرزان طراحی، و بر روی عرشه‌ی میز لرزان توسط بنا و کارگران ساختمانی ساخته شد. در ساخت این اتاق سعی شد تا روش ساخت، مشابه روش‌های رایج بنایی در کشور باشد.

شکل ۱ پلان اتاق را نشان می‌دهد. با توجه به ابعاد میز لرزان، اتاق به صورت مربعی با ابعاد داخلی  $3000 \times 3000$  mm طراحی شد. هیچ‌گونه پیش‌آمدگی یا پس‌رفتگی در اتاق وجود ندارد. ارتفاع کلی اتاق  $2700$  mm و سقف آن از نوع طاق ضربی است. ارتفاع آزاد دیوارها از روی کلاف بتنی زیر دیوار  $2200$  mm است و ضخامت متوسط آنها  $205$  mm است. قبل از آزمایش‌های نهایی، بر روی دیوار جنوبی یک لایه اندود گچ نیز اجرا شد و ضخامت متوسط دیوار جنوبی به  $220$  mm رسید. برای ساخت دیوار از آجر فشاری و ملات ماسه سیمان استفاده شد. در شکل ۲ نمای جنوبی و شرقی اتاق مشاهده می‌شود.

قبل از ساخت اتاق، ورقه‌های فولادی آج‌دار به‌کمک ۱۶ عدد پیچ فولادی به قطر  $50$  mm و با فواصل  $800$  mm از یکدیگر به عرشه‌ی میز لرزان پیچ شدند. با توجه به این که حرکت میز لرزان مؤلفه‌ی قائم ندارد این پیچ‌ها همراه با اصطکاک موجود قادر بودند به‌نحو مطلوبی نیرو را از میز لرزان به کلاف افقی بتنی زیر دیوار منتقل کنند.

پوشش سقف از نوع طاق ضربی است. بدین منظور از چهار تیرچه‌ی نمره IPE120 در جهت شمالی - جنوبی استفاده شد. دو تیرچه از چهار تیرچه‌ی مزبور بر روی دیوارهای شرقی و غربی مستقر شدند و نقش کلاف افقی روی دیوار را نیز داشتند. دو تیرچه‌ی میانی، سقف را به سه نوار مساوی تقسیم کردند که با طاق ضربی

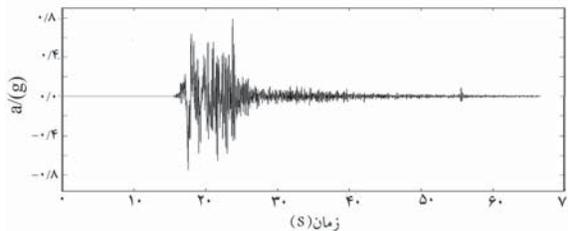
## ۶. مشخصات مصالح مصرفی

در طی ساخت اتاق آجری و نیز پس از انجام آزمایش اصلی، آزمایش‌هایی بر روی مصالح مصرفی انجام شد. براساس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، مقاومت فشاری متوسط آجر  $4/6 \text{ MPa}$ ، مقاومت فشاری متوسط بتن کلاف زیردیوار  $19/3 \text{ MPa}$ ، مقاومت فشاری  $28$  روزهی ملات دیوار و کلاف قائم  $3/6$ ، مقاومت کششی تسلیم متوسط میگرد  $292/4 \text{ MPa}$  و مقاومت کششی نهایی متوسط میگرد  $374/9 \text{ MPa}$  است. مقاومت فشاری بتن براساس نمونهی استوانه‌یی  $300 \times 150$  میلی‌متری و مقاومت فشاری ملات براساس نمونهی مکعبی به ابعاد  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$  به دست آمد. ملات استفاده شده از ماسه همراه با خاک و با سیمان کم ساخته شد و دارای مقاومت نسبتاً پایینی بود. جرم کل سازه برابر  $14300$  کیلوگرم و جرم سقف طاق ضربی و پوشش آن برابر  $3190$  کیلوگرم برآورد شد.

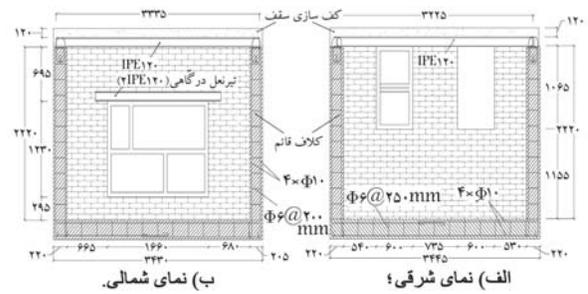
## ۷. مراحل انجام آزمایش

پس از گذشت ۷۰ روز از ساخت اتاق آجری بر روی میز لرزان، در چند مرحله آزمایش‌های لرزه‌یی مختلف بر روی آن صورت گرفت. قبل از انجام آزمایش‌های اصلی، به کمک دستگاه اندازه‌گیری و براساس ارتعاشات محیطی، فرکانس ارتعاش آزاد و ضریب میرایی سازه در دو جهت متعامد اندازه‌گیری شد. براین اساس، فرکانس ارتعاش آزاد کم‌دامنه در جهت شمالی - جنوبی برابر  $13/38 \text{ Hz}$  و در جهت شرقی - غربی برابر  $12/68 \text{ Hz}$  به دست آمد. با توجه به وجود بازشوی بیشتر در دیوارهای شمالی و جنوبی، اختلاف نتایج دو جهت قابل توجه است. نسبت میرایی برای ارتعاش کم‌دامنه‌ی سازه نیز در جهت شمالی - جنوبی برابر  $0/27$ ، و در جهت شرقی - غربی برابر  $0/25$  به دست آمد.

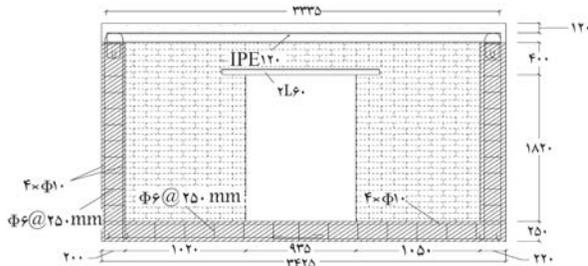
آزمایش‌های اصلی انجام شده بر روی سازه شامل دو مرحله بود. در مرحله‌ی اول ۳ رکورد از زلزله‌های مهم ثبت، و در دو مقیاس مختلف به سازه اعمال شدند. مجموعه‌ی این رکوردها در مقیاس کم‌دامنه شامل زلزله‌ی بم با مقیاس یک‌چهارم، زلزله‌ی طیس با مقیاس یک‌دهم و زلزله‌ی ال‌سنتر با مقیاس یک‌دوم بود. در مقیاس با دامنه‌ی قوی‌تر به ترتیب، زلزله‌ی بم با مقیاس یک‌دوم، زلزله‌ی طیس با مقیاس یک‌پنجم و در نهایت زلزله‌ی ال‌سنتر با مقیاس کامل وارد شدند. در شکل‌های ۵ تا ۹ رکوردهای مؤلفه‌ی شتاب این زلزله‌ها مشاهده می‌شوند. رکوردهای بم و طیس به صورت دو مؤلفه‌ی هم‌زمان و رکورد زلزله ال‌سنتر به صورت تک‌مؤلفه‌ی اعمال شدند. بر اثر اعمال این رکوردها آسیب و ترک‌های محدودی بر روی اتاق ایجاد شد. در مرحله‌ی دوم، برای ایجاد تخریب بیشتر و بررسی سازوکار خرابی، سازه تحت



شکل ۵. مؤلفه‌ی اول شتاب افقی،  $a_1$ ، رکورد زلزله‌ی بم که در جهت شمالی - جنوبی، به‌طور هم‌زمان با مؤلفه‌ی دوم بر سازه وارد شد.



شکل ۳. محل بازشوها (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر).  
(الف) نمای شرقی؛ (ب) نمای شمالی.



شکل ۴. بازشوی نمای جنوبی (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر).

شمالی و بازشوی جنوبی ضلع شرقی پنجره‌ی فلزی به همراه شیشه نصب شد ولی بازشوی جنوبی و بازشوی دیگر ضلع شرقی فاقد درب یا پنجره بودند. هدف از عدم نصب چهارچوب درب و پنجره در برخی از بازشوها، مطالعه‌ی اثر وجود آنها در هنگام زلزله بوده است.

## ۵. کلاف‌بندی

اتاق مورد آزمایش دارای کلاف‌بندی قائم و افقی در بالا و پایین دیوارها است. کلاف‌بندی افقی شامل کلاف بتنی در زیر دیوارها و کلاف فلزی افقی (تیرکلاف) در تراز سقف سازه است. کلاف زیر دیوارها با ابعاد  $250 \times 250 \text{ mm}$  طراحی و اجرا شد. میلگردهای طولی در کلاف‌های افقی شامل ۴ میلگرد صاف نمره ۱۰ است. فاصله‌ی محور به محور کلاف‌های قائم در هر دیوار اتاق  $3200 \text{ mm}$  است. برای اجرای کلاف‌های قائم از همان ملات آجرچینی دیوارها استفاده شد. مقطع کلاف‌های قائم برابر  $200 \times 200 \text{ mm}$  است. برای مسلح‌کردن کلاف قائم از چهار میلگرد صاف نمره ۱۰ استفاده شد. میلگردهای طولی کلاف قائم با تنگ‌هایی به قطر  $6 \text{ mm}$  و در فواصل  $200$  میلی‌متری به هم بسته شدند. ابعاد مقطع کلاف‌ها و مقدار تسلیح آنها براساس حداقل مقادیر مجاز استاندارد  $2800^{[16]}$  است.

تیر کلاف فلزی تراز سقف در گوشه‌های اتاق توسط نبشی به یکدیگر جوش داده شدند. کلاف‌های افقی در تراز سقف نقش تیرآهن‌های لازم برای طاق ضربی را نیز دارند. برای یک‌پارچگی کلاف‌های قائم و افقی، ورق‌های فولادی به ابعاد  $5 \times 120 \times 150 \text{ mm}$  همراه با دو شاخک فلزی U شکل که به زیر آن جوش داده شدند، به صورت مدفون در انتهای فوقانی هر کدام از کلاف‌های قائم قرار داده شد. کلاف‌های فلزی افقی به روی این ورق‌های زیرسری جوش شدند. برای مهار بهتر، میلگردهای طولی کلاف‌های قائم در قسمت فوقانی، به صورت انتظار از کلاف قائم خارج شده و پس از استقرار کلاف‌های افقی سقف، دور آنها قلاب شده و به آنها جوش شدند. در شکل ۴ مشخصات کلاف‌های قائم و افقی مشاهده می‌شوند.

اثر حرکات هارمونیک قوی قرار گرفت. در شکل ۱۰ رکورد شتاب اعمالی نشان داده شده است. این رکورد سینوسی با فرکانس  $10\text{ Hz}$  و با دامنه‌ی جابه‌جایی افزایش یافته تا حداکثر  $5\text{ mm}$ ، در دو جهت متعامد افقی به‌طور همزمان به مدت  $105$  ثانیه اعمال شد.

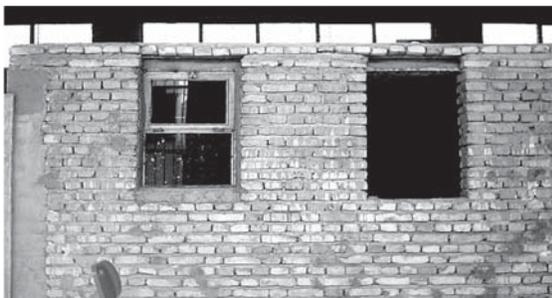
علت انتخاب فرکانس  $10$  هرتز، نزدیک بودن آن به فرکانس طبیعی سازه است. بدین ترتیب بیشترین دامنه‌ی شتاب اعمالی  $2701$  برابر شتاب ثقل بوده است.

## ۸. مشاهدات حاصل از آزمایش

برای بررسی دقیق سازه، به‌کمک چند دوربین دیجیتال با سرعت بالا و از زوایای مختلف، از رفتار سازه در حین انجام آزمایش تصویربرداری شد. در مرحله‌ی اول آزمایش در نقاط مختلف دیوارها ترک‌هایی با بازشدگی و طول محدود مشاهده شد، ولی تخریب اساسی یا ریزش آجر مشاهده نشد. دیوارها در گوشه‌های بازشوها و نیز در قسمت دورچینی بالای دیوار ضعیف بیشتری از خود نشان دادند. به‌علت تمرکز تنش در گوشه‌های بازشوها، ترک‌ها از این نقاط شروع شدند.

در مرحله‌ی دوم آزمایش، بیشترین آسیب در دیوار شرقی و نیز در دورچینی بالای دیوارها مشاهده شد. نیمه‌ی شمالی دیوار شرقی که فاقد پروفیل پنجره بود بیشترین آسیب را متحمل شد. شکل ۱۱ نمای دیوار شرقی را قبل از آزمایش و شکل ۱۲ نمای دیوار شرقی را پس از انجام آزمایش نشان می‌دهد.

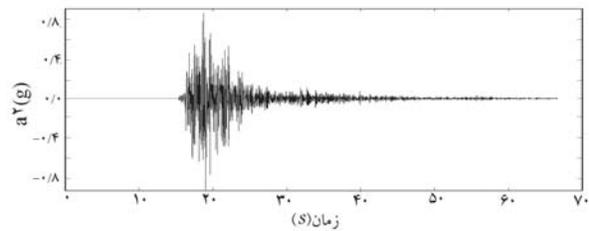
به‌علت خزش بیشتر دیوار بنایی نسبت به کلاف‌های قائم و نشست نسبی دیوار نسبت به کلاف افقی فلزی، با گذشت عمر سازه، اتصال کلاف فلزی به دیوار ضعیف‌تر شده بود. به‌علت ارتعاش خارج از صفحه، ضعیف‌ترین تکیه‌گاه خارجی دیوار، لبه‌ی آن در تراز کلاف بالا بوده و دیوارها شروع به خرابی از آن‌کناره‌ها کردند. چنان‌که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود انتقال وزن به‌طور عمده از طریق تیرچه‌های فلزی



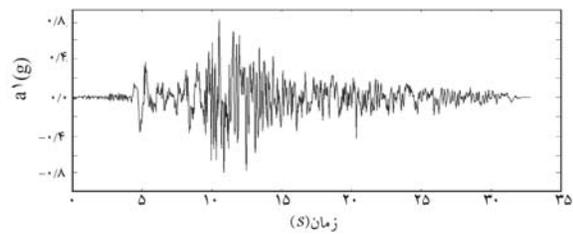
شکل ۱۱. نمای شرقی اتاق قبل از آزمایش.



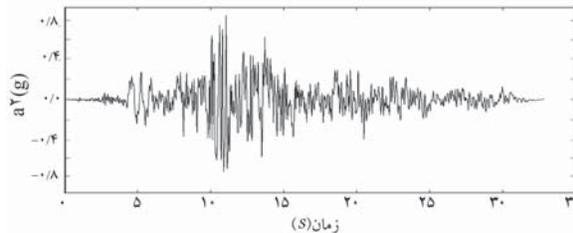
شکل ۱۲. نمای شرقی اتاق بعد از مرحله‌ی دوم آزمایش.



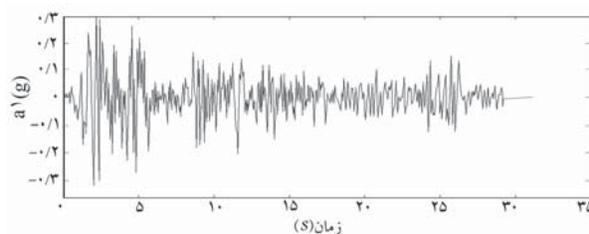
شکل ۶. مؤلفه‌ی دوم شتاب افقی،  $a_2$ ، رکورد زلزله بم که در جهت شرقی - غربی، به‌طور همزمان با مؤلفه اول، بر سازه وارد شد.



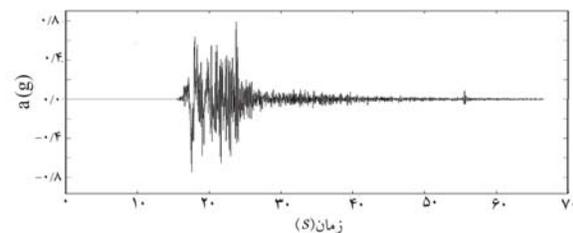
شکل ۷. مؤلفه‌ی اول شتاب افقی،  $a_1$ ، رکورد زلزله‌ی طبرس که در جهت شمالی - جنوبی، به‌طور همزمان با مؤلفه دوم، بر سازه وارد شد.



شکل ۸. مؤلفه‌ی دوم شتاب افقی،  $a_2$ ، رکورد زلزله‌ی طبرس که در جهت شرقی - غربی، به‌طور همزمان با مؤلفه‌ی اول بر سازه وارد شد.



شکل ۹. مؤلفه‌ی اول شتاب افقی،  $a_1$ ، رکورد زلزله‌ی ال‌سنتر که به‌تنهایی در جهت شرقی - غربی بر سازه وارد شد.



شکل ۱۰. شتاب هارمونیک اعمال شده، به‌صورت همزمان و یکسان در دو جهت متعامد افقی.



شکل ۱۵. ترک افقی و بازشدگی محدود بین کلاف قائم و دیوار در مرحله اول آزمایش.



شکل ۱۶. اتصال کلاف قائم و افقی پس از مرحله دوم آزمایش.

فاصله بین تنگ‌های کلاف‌ها در این امر مؤثر بوده است. در شکل ۱۶ اتصال کلاف قائم و کلاف افقی سقف نشان داده شده است. علی‌رغم ریزش آجرهای اطراف، در این اتصال تخریب اساسی به وجود نیامده و انسجام کلاف‌بندی از بین نرفته است. بررسی بخش‌های مختلف کلاف‌های قائم نشان می‌دهد که این کلاف‌ها گیرداری مناسبی با آجرهای دیوار اتاق داشته‌اند. با وجود عدم تسلیح دیوار و اجرای غیرهمزمان کلاف‌های قائم و دیوار، پیوستگی کافی بین آنها ایجاد شده بود. ظهور درز قائم بین دیوار و کلاف قائم در برخی نواحی (شکل ۱۵)، باعث ریزش دیوار در این محل‌ها نشد. طول این‌گونه بازشدگی‌ها محدود بوده و به سرتاسر نواحی کلاف قائم گسترش نیافت.

در هیچ‌یک از مراحل آزمایش، چه به صورت موضعی و چه به صورت کلی، ریزشی در طاق ضربی سقف اتاق مشاهده نشد. به‌طور کلی به دلیل این که حرکت میز لرزان مؤلفه قائم نداشت، آسیب کم‌تری به سقف سازه وارد شد. رعایت ضوابط مهاربندی ضربدری سقف و مهار تیرهای پاتاقی انتهایی از نظر حفظ انسجام سقف در زلزله مؤثر بوده است.

## ۹. مطالعات تحلیلی

پس از انجام آزمایش، با استفاده از روش اجزاء محدود و توسط نرم‌افزار ANSYS، [۱۷] دیوار آجری با استفاده از المان‌های سه‌بعدی مدل‌سازی شده و با انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی، اثر بار قائم سقف و تأثیر وجود بازو بر دیوار و همچنین رفتار خارج از صفحه دیوار بررسی شد. [۱۸]

در شکل ۱۷ مدل دیوار همراه با کلاف‌های قائم و افقی نشان داده شده است. به‌منظور بررسی اثر بار قائم، رفتار دیوار در دو حالت بارگذاری مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. در حالت اول، سربار قائم به میزان  $50 \text{ kg/m}^2$  به‌عنوان بار سقف

به کلاف‌های روی دیوارهای شمالی و جنوبی باعث افزایش اصطکاک بین کلاف افقی و دیوار می‌شود. ریزش به خارج از صفحه برای دیوارهای شرقی و غربی که وزن کم‌تری از سقف به آنها می‌رسد، و در نتیجه وجود اصطکاک و مقاومت جانبی کم‌تر مشهودتر است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).

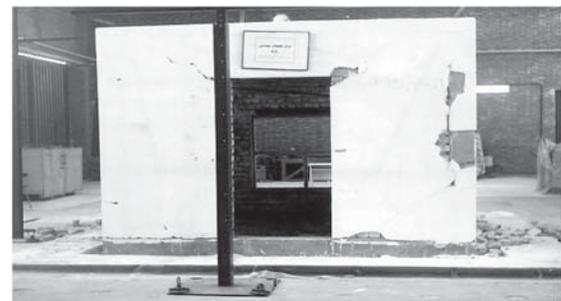
در شکل ۱۳ ریزش آجرهای زیرکلاف افقی بر اثر نیروهای اینرسی عمود بر صفحه دیوار غربی ملاحظه می‌شود. با توجه به این که دورچینی سقف پس از ساخت دیوارها و استقرار تیرهای فلزی سقف صورت گرفته است، آجرهای مجاور روی تیر آهن کلاف نیز ریزش کرده‌اند. علاوه بر اصطکاک و چسبندگی بهتر کلاف افقی سقف و دیوار، وجود پنجره‌ی دارای پروفیل فلزی در دیوار شمالی و نیز افزایش مقاومت ناشی از نازک‌کاری در دیوار جنوبی باعث شد تا این دیوارها آسیب کم‌تری نسبت به دیوارهای غربی و شرقی متحمل شوند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).

در شکل ۱۴ دیوار جنوبی پس از انجام مرحله دوم آزمایش نشان داده شده است. ترک گوشه‌ی درب در زمان اعمال یک‌چهارم زلزله بم ایجاد شده است. ریزش نازک‌کاری روی کلاف قائم و جدایش نسبی بین کلاف قائم و دیوار در خلال مرحله دوم آزمایش ایجاد شد ولی آجرهای دیوار به بیرون پرت نشد. به‌علت دقت در اجرای آرماتوربندی و اتصال مناسب کلاف‌های قائم و افقی به یکدیگر، این کلاف‌ها رفتار مطوبی از خود نشان دادند. در مرحله اول آزمایش ترک‌هایی عمدتاً افقی در کلاف‌های قائم ایجاد شد. درزهای اجرایی کلاف‌های قائم در ایجاد و گسترش این ترک‌ها مؤثر بودند. ایجاد این‌گونه ترک‌ها مشکل عمده‌ی در باربری لرزه‌ی ایجاد نمی‌کند. شکل ۱۵ نمونه‌ی از ترک‌های افقی ایجاد شده در کلاف‌های قائم را نشان می‌دهد. در مرحله اول آزمایش هیچ‌گونه آسیب جزئی یا کلی در کلاف‌های افقی پایین یا بالای دیوار مشاهده نشد.

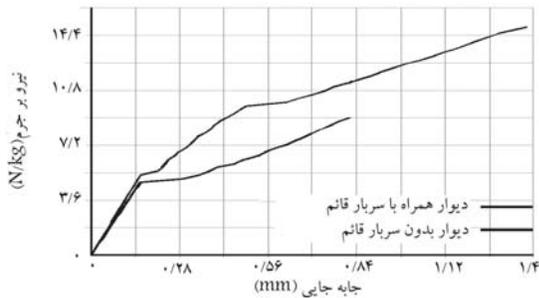
در مرحله دوم آزمایش خرابی‌هایی موضعی در پوشش میلگردهای کلاف‌های قائم ایجاد شد ولی میلگردهای طولی کلاف به طرف بیرون کمانش نکردند. رعایت



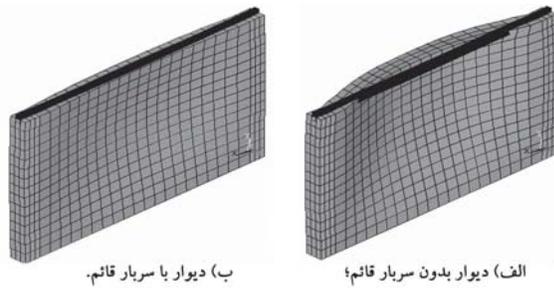
شکل ۱۳. نمای غربی و شمالی اتاق پس از مرحله دوم آزمایش.



شکل ۱۴. نمای جنوبی اتاق پس از مرحله دوم آزمایش.



شکل ۱۹. نمودار نیرو - تغییر مکان خارج از صفحه‌ی دیوار.



شکل ۲۰. تغییر شکل خارج از صفحه دیوار.

نشان می‌دهد. دیوار بدون سربار در مقدار بار بسیار کم‌تری نسبت به مدل همراه با سربار به نقطه‌ی شکست می‌رسد. در شکل ۲۰ تغییر شکل دو مدل در مقدار بار جانبی معادل  $8/58 \text{ kN/kg}$ ، که معادل  $0.7875$  برابر وزن دیوار است، با بزرگ‌نمایی  $300$  برابر نشان داده شده است.

همچنین نتایج حاصل از تحلیل دیوارهای با باز شو حاکی از آن است که وجود بازشوها به‌طور قابل توجهی از میزان سختی و مقاومت دیوار می‌کاهد. [۱۹]

## ۱۰. نتیجه‌گیری

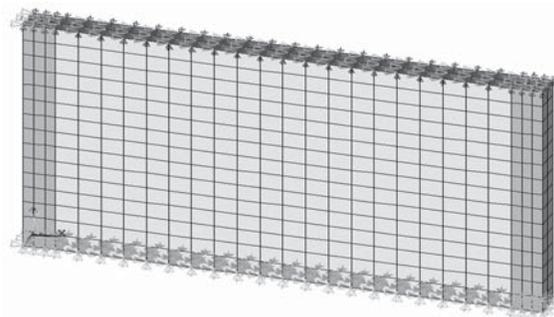
۱. اجرای صحیح و یک‌پارچه‌ی کلاف‌بندی، به‌ویژه اتصال درست کلاف‌های قائم و افقی، در استقامت سازه‌های آجری نقش عمده دارد.
۲. به‌دلیل تغییر شکل‌های زمانی، امکان دارد که بالای دیوار آجری در زیر کلاف به‌تدریج نشست کند هرچند تیر آهن کلاف متکی به کلاف‌های قائم، جابه‌جایی کم‌تری به سمت پایین داشته باشد. این جدایش می‌تواند منجر به کاهش اصطکاک بین دیوار و کلاف افقی روی آن و در نتیجه ضعف دیوار در مقابل نیروهای اینرسی عمود بر صفحه‌ی دیوار شود.
۳. در رابطه با بازشوها، چهارچوب داخل آن نقش مهمی در استحکام و یکپارچگی دیوار دارد. توصیه می‌شود که در مورد بازشوهایی که ابعاد آنها از نظر آیین‌نامه در محدوده‌ی مجاز قرار دارند نیز، نصب چهارچوب مناسب مهار شده به دیوار مورد تأکید قرار گیرد.
۴. نتایج حاصل از تحلیل مدل اجزاء محدود اتاق از نظر رفتار کلی و سازوکار خرابی با نتایج حاصل از آزمایش تطابق خوبی داشت. با توجه به هزینه‌ی نسبتاً زیاد آزمایش می‌توان مطالعات دامنه‌دار را با تعداد کم‌تر آزمایش و در عوض تعداد بیشتری مدل‌سازی انجام داد.

و به‌صورت یک بار خطی گسترده بر تیر کلاف فلزی روی دیوار اعمال شد. در حالت دوم هیچ‌گونه بار قائم اضافی بر دیوار اعمال نشد.

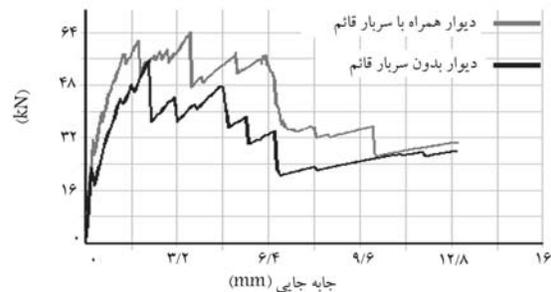
بارگذاری مدل‌ها با اعمال تدریجی تغییر مکان به گره‌های قسمت فوقانی دیوار انجام شد. این تغییر مکان در راستای طولی دیوار اعمال شد و در جهات دیگر حرکت دیوار آزاد بود. شکل ۱۸ نشان‌گر نمودار نیرو - تغییر مکان برای هر دو مدل است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، وجود سربار قائم تأثیر قابل ملاحظه‌ی بر رفتار دیوار دارد، که این تأثیر در محدوده‌ی رفتار غیرخطی، یعنی بعد از ایجاد ترک در دیوار، مشهودتر است.

برای بررسی تأثیر سربار قائم بر رفتار خارج از صفحه‌ی دیوار نیز، دیوار با دو حالت با سربار و بدون سربار در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی لغزش بین تیر سقف و دیوار، بین اجزای تیر کلاف فلزی سقف و اجزای دیوار المان‌های تماس قرار داده شد. پس از اعمال وزن، مدل تحت اثر بارگذاری استاتیکی غیرخطی در جهت عمود بر صفحه‌ی دیوار قرار گرفت. بدین‌منظور بار گسترده‌ی حجمی در گام‌های افزایشی به دیوار وارد، و مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه‌ی وسط دیوار در هر گام اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۹ نمودار نیرو - تغییر مکان برای حرکت خارج از صفحه در دو حالت با و بدون سربار نشان داده شده است. در این نمودار محور افقی تغییر مکان وسط دیوار در جهت عمود بر صفحه‌ی دیوار، و محور قائم نیروی حجمی وارد بر واحد جرم دیوار - در راستای عمود بر صفحه‌ی دیوار - را نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک بین دیوار آجری و تیر آهن فولادی روی آن برابر  $0.2$  در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، در مراحل ابتدایی اعمال بار که دیوار هنوز وارد مرحله‌ی غیرخطی نشده، سختی دو مدل با هم برابر است. پس از ایجاد ترک، سختی مدل بدون سربار کاهش بیشتری نسبت به مدل همراه با سربار



شکل ۱۷. مدل ساخته شده برای بررسی رفتار دیوار.



شکل ۱۸. نمودار نیرو - تغییر مکان دیوار با و بدون سربار قائم برای بارگذاری جانبی داخل صفحه.

1. Moghadam, H. "Behavior of brick structures in Manjil earthquake", The 1st International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, (1991).
2. Maheri, M.R. "Manjil, Iran earthquake of June 1990, some aspects of structural response", *Journal of Structural Engineering Review*, **4**(1), pp. 1-16 (1992).
3. Tasnimi, A.A.; Hajesmaeili, M. "The effect of opening in brick structures", The 4th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran (2003).
4. Tasnimi, A.A. "Behavior of brick walls recommended by standard 2800", Building and Housing Research Center, BHRC Publication No. R-404.
5. Benedetti, D.; Carydis, P.; and Pezzoli, P. "Shaking table tests on 24 simple masonry buildings", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**(1), pp. 67-90 (1998).
6. UCB/EERC. "Shaking table study of single-story masonry houses", UCB/EERC - 79/25, (1979).
7. Fakhryasari, S. "Brick structures code", Structural Team of Jahade Dandshgahi, Sharif University of technology, (1983).
8. Nategallahi, F. "Design and construction of seismic resistant masonry buildings", Nopardazan, Tehran, (2003).
9. Moghadam, H. "Seismic design of brick masonry buildings", Institute of Scientific Publications of Sharif University of Technology, Tehran, (1994).
10. Vasseghi, A.; Maheri, M.R.; Motamedi, M.; and Alemi, F. "Guidelines for seismic evaluation of masonry buildings in Iran", Fourth International Conference of Earthquake Engineering and Seismology, Islamic Republic of Iran, (12-14 May 2003).
11. FEMA 306, Federal Emergency Management Agency, Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Basic Procedures Manual, Washington D.C., (1998).
12. FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington D.C., (2000).
13. Vafaei, A.; Mofid, M.; and Fakhrimoghadam, P. "Study of in fills and micromodeling of brick walls", the 1st National Congress on Civil Engineering, Sharif University of Technology, (2004).
14. Moghadam, H.A. "On the characteristics of infilled frames", *Journal of Structural Engineering*, **130**