دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۲۹
پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۷

مطالعه تخریبِ لرزه‌ای یک حجره خشتی در ارگ بم و ارائه طرح مرمت آن*

سید امیرمهرداد حجازی** بینا حجازی*** حامد مهداد**** صبا حجازی*****

چکیده

پس از تخریب گسترده ارگ تاریخی بم در زلزله ۵ دی ۱۳۸۲، مرمت ارگ براساس یک برنامه عملیاتی ده‌ساله آغاز شد. باتوجه‌به عدم وجود تجربیات و دانش کافی درباره مرمت و مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی- تاریخی در ایران و به‌دلیل ضرورت ارتقای دانش و کسب تجربه مرمت یک ساختار خشتی، مطالعه دلایل تخریب یک حجره خشتی در بازار ارگ دراثر زلزله و ارائه طرح مرمت و مقاوم‌سازی آن، به‌عنوان پروژه‌ای مبنایی انجام شد. هدف اصلی این طرح مرمتی، بازگرداندن وضعیت حجره خشتی به شرایط قبل از زلزله و افزایش مقاومت آن دربرابر زلزله‌های آتی بود. روش پژوهش، توصیفی- تحلیلی و شیوه گردآوری اطلاعات از گونه کتابخانه‌ای و میدانی بود. پس از مطالعه مستندات موجود درباره تاریخ و معماری ارگ بم و حجره‌های بازار و تکنیک‌ها و مصالح بومی به‌کاررفته در ساخت آن، در یک کار میدانی و کارگاهی وسیع مستندسازی، آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری انجام شد. برمبنای منشورهای مرمت بناهای تاریخی، طرح مقاوم‌سازی و مرمت پیشنهاد و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی گردید. نتایج حاصل از مطالعات، بیانگر عملکرد ضعیف سازه موجود در زلزله‌های آینده و ایجاد خسارات مشابه درصورت مرمت‌نمودن بدون مقاوم‌سازی آن بود. تحلیل‌ها نشان داد، می‌توان با قراردادن تعدادی عناصر تقویت‌کننده چوبی در گوشه دیوارها و لبه بازشوها و اتصال افقی آنها به تراز سقف که روشی است با حداقل مداخله و نیز برگشت‌پذیر، رفتار سازه را به مقدار زیادی بهبود بخشید و خسارات وارده بر سازه خشتی را در زلزله‌های آتی ازبین برد. همچنین توسط پی‌بندی و در مواردی بازسازی‌های جزئی، تزریق دوغاب و بازسازی اتصالات ازبین‌رفته، می‌توان بنا را به وضعیت مقاوم‌تر از قبل از وقوع زلزله برگرداند به‌طوری‌که، درآینده دربرابر زلزله مقاومت قابل قبولی را از خود نشان دهد.

کلیدواژگان: ارگ بم، حجره خشتی، رفتار لرزه‌ای، مقاوم‌سازی، مرمت.

---

* مقاله پیش‌رو، برگرفته از پروژه‌ای تحقیقاتی باعنوان "مرمت و بازسازی یک حجره خشتی در بازار ارگ بم" است که با حمایت مالی حاصل از قرارداد شماره ۸۷/۲۳۶۳۸ مورخ ۱۳۸۷/۴/۲۳ بین دانشگاه اصفهان (به‌عنوان مؤسسه پژوهشی) و پروژه نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم (سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور، به‌عنوان کارفرما) با شماره ثبت ۲۳۳۳ با استفاده از تسهیلات بند "د" ماده ۴۵ قانون برنامه چهارم توسعه کشور، انجام شده است.

** دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان. m.hejazi@eng.ui.ac.ir
*** کارشناسی‌ارشد مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان، اصفهان.
**** کارشناس‌ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، اصفهان.
***** کارشناسی مهندسی معماری، دانشگاه هنر اصفهان.

مقدمه

ارگ بم، بزرگ‌ترین مجموعه خشتی جهان در زلزله ۶/۵ ریشتری ۵ دی ۱۳۸۲، دچار خسارت و تخریب چشمگیری گردید. به‌دلیل اهمیت جهانی این مجموعه، با تشکیل کمیته‌های ملی و بین‌المللی، برنامه‌ای درازمدت برای مرمت و بازسازی ارگ بم تعریف شد که در مرحله اول آن، برخی از بناهای مهم ارگ مرمت یا بازسازی شدند (پایگاه نجات‌بخشی ارگ بم، ۱۳۸۶- الف). یکی از مهم‌ترین مشکلات در مرمت سازه‌ای، مقاوم‌سازی و بازسازی بناهای آسیب‌دیده یا تخریب‌شده ارگ بم و عدم وجود تجربیات و دانش کافی در سطح ملی و جهانی بود. بدین‌دلیل، کمیته راهبردی پروژه نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم تصمیم گرفت، تعدادی پروژه را برای مرمت و مقاوم‌سازی بخش‌های مهم ارگ ازطریق متخصصان ایرانی و خارجی در برنامه‌ای ده‌ساله به‌انجام رساند. این کار برای این بود که بتواند نتایج حاصل از انجام پروژه‌ها را جمع‌آوری کند و به‌صورت دستورالعملی برای سازه‌های خشتی- تاریخی مشابه به‌کار گیرد. بناهای موردِمطالعه به‌گونه‌ای انتخاب شدند که دارای برخی ویژگی‌های مشترک و بعضی تفاوت‌ها باشند به‌طوری‌که با حرکت کلیه پروژه در یک مسیر مشترک، مجریان پروژه‌ها روش‌ها و طرح‌های مختلفی را اجرا نمایند تا بتوان درانتها آنها را مقایسه و نقد نمود و از تجارب به‌دست‌آمده در تدوین یک دستورالعمل استفاده کرد.

یکی از حجره‌های خشتی در انتهای بازار اصلی ارگ بم که در اثر زلزله دچار خسارات نسبتاً زیادی شده بود، به‌عنوان یک پروژه مبنا انتخاب شد. به‌دلیل اینکه، دارای موقعیت مناسب و درمعرض دید بازدیدکنندگان ارگ بم و دارای ویژگی‌های ساختاری مشابه با تعداد زیاد دیگری حجره در همین بازار بود. چنین انتخابی برای این بود که روش مقاوم‌سازی و مرمت آن برای سایر حجره‌ها ملاک عمل قرار گیرد. هدف از انجام این پروژه، مرمت بنا به‌شکل قبل از زلزله و مقاوم‌سازی آن به‌صورتی بود که درصورت وقوع زلزله مشابه، خسارات وارده کاهش یابد یا حذف شود. همچنین، استفاده از مصالح و تکنیک‌های بومی، حداقل مداخله و برگشت‌پذیربودن مداخلات به‌عنوان اصلی مهم در انجام این پروژه مدنظر قرار گرفتند.

موقعیت مناسب این حجره و وجود مستندات به‌نسبت بسیار درباره بازار ارگ بم از زمان‌های دور و قبل از زلزله، این امکان را فراهم آورد که مطالعات تاریخی، معماری، باستان‌شناسی، آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری با استفاده از تکنیک فتوگرامتری و انجام تست‌های آزمایشگاهی روی مصالح آن، با دقت و راحتی بیشتری صورت گیرد. پس از انجام مطالعات مذکور، نسبت به مدل‌سازی سازه حجره اقدام گردید و نشان داده شد درصورتی‌که مرمت بنا بدون انجام مقاوم‌سازی صورت گیرد، با وقوع زلزله خسارات مشابهی به آن وارد خواهد شد. لذا براساس دستورالعمل‌ها و منشورهای مرتبط با مرمت بناهای باارزش تاریخی، نسبت به ارائه طرح مقاوم‌سازی و مرمت این حجره خشتی اقدام گردید. نتایج حاصل از انجام این پروژه، در این مقاله تشریح می‌شود.

پیشینه پژوهش

به‌دلیل اهمیت آگاهی‌داشتن بر رفتار لرزه‌ای و روش‌های مؤثر مقاوم‌سازی بناهای خشتی، از حدود نیم‌قرن پیش محققان زیادی در کشورهای مختلف به امر پژوهش در این زمینه پرداختند. اولین تحقیقات مستمر که هنوز هم ادامه دارد، در کشور پرو در دهه ۱۹۷۰ آغاز شد و منجر به دردسترس‌قراردادن اطلاعات و راهکارهای بسیاری گردید (Vargas et al., 2005). درهمین‌راستا، *کرازائو* و *بلوندت*[1] (۱۹۷۳)، مکانیزم فروپاشی تعدادی دیوار خشتی را با مقیاس واقعی با آزمایش مطالعه کردند و نشان دادند تقویت دیوارها با شاخه‌های نیشکر که به‌صورت افقی در داخل دیوارها قرار می‌گیرند، یا تقویت با چوب یا سیم فولادی می‌تواند مقاومت لرزه‌ای را افزایش دهد. *بلوندت* و *وارگاس*[2] (۱۹۷۸) نیز، تعدادی آزمایش استاتیکی روی دیوارهای خشتی با مقیاس واقعی تحت اثر نیروی برشی و خمش انجام دادند و گزارش نمودند که بهترین وضعیت مقاوم‌سازی، قراردادن شاخه‌های نیشکر به‌صورت قائم داخل دیوار با فواصلی مساوی یک‌ونیم برابر ضخامت دیوار است. *بلوندت* و همکاران (۲۰۰۵)، به‌منظور بررسی اثر استفاده از مصالح ارزان‌قیمت مانند شبکه‌های ژئو، پلاستیکی یا فلزی بر مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، تعداد بسیاری دیوار خشتی را تحت اثر نیروهای افقی چرخه‌ای آزمایش کردند. آنان روش‌های مختلف مقاوم‌سازی را بررسی نمودند و نشان دادند که شکل‌پذیری دیوارها به مقدار درخور توجهی افزایش می‌یابد. پروژه مهم دیگر در این زمینه را مؤسسه حفاظت گتی (۱۹۹۰) آغاز کرد که تا به امروز نیز، ادامه دارد. هدف از انجام این پروژه، ارزیابی روش‌های مقاوم‌سازی موجود و پیشنهاد روش‌های جدید با انجام آزمایش‌های متعدد روی نمونه‌های واقعی بود که حاصل آن، تهیه چند دستورالعمل فنی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی- تاریخی بود. *نوگوئز* و *ناوارو*[3] (۲۰۰۵)، به‌منظور بررسی نحوه مرمت دیوارهای خشتی با استفاده از شبکه‌هایی از جنس مواد مصنوعی، با ساختن تعدادی دیوار که برخی از آنها از خشت معمولی و برخی از خشت صنعتی ساخته شده بودند و تحت بار مرده و

بار جانبی چرخه‌ای قرار داشتند، نشان دادند باوجود رخ‌دادن گسیختگی‌های اساسی در چند مورد، دیوارهایی با خشت صنعتی دارای مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری هستند. پس از مقاوم‌سازی دیوارهای آسیب‌دیده با شبکه‌هایی از جنس مواد مصنوعی و ایجاد پوشش روی آنها با ماسه و سیمان، نشان داده شد که این روش مقاوم‌سازی دربرابر بارهای جانبی روشی مناسب است. *زاوالا* و *ایگاراشی*[۴] (۲۰۰۵)، مجموعه آزمایش‌هایی را روی دیوارهای خشتی به‌طول ۲/۴۵، ارتفاع ۲/۳ و ضخامت ۰/۲ متر انجام دادند. یک بار افقی چرخه‌ای در ارتفاع ۱/۱۸ متر از پایه به دیوارها وارد شد، به‌جز یک دیوار که در آن بار به بالای دیوار اعمال گردید. استفاده از دو نوع مختلف مقاوم‌سازی دیوارها باعث افزایش ظرفیت مقاومت جانبی، ظرفیت مقاومت کلی و ظرفیت تغییر شکل دیوارها شد. *یامین*[۵] و همکاران (۲۰۰۷)، تعداد ۱۸ دیوار به‌طول ۲/۵، ارتفاع ۲ و ضخامت ۰/۵-۰/۴ متر را از جنس خشت یا چینه و در سه حالت تقویت‌نشده، تقویت‌شده با شبکه و تقویت‌شده با چوب تحت ترکیب بارهای قائم و بارهای افقی چرخه‌ای وارد بر بالای دیوار آزمایش کردند. آنان نشان دادند که با استفاده از تقویت می‌توان با فراهم‌کردن پیوستگی و محصورشدگی سازه‌ای، آسیب‌پذیری لرزه‌ای دیوارهای خشتی را کاهش داد. *فیگوئیردو*[۶] و همکاران (۲۰۱۳)، با قراردادن یک دیوار خشتی تقویت‌نشده درمعرض بار افقی چرخه‌ای و سپس مرمت‌نمودن آن با تزریق فشاری ملات آهک در داخل ترک‌های ایجادشده و نیز مقاوم‌سازی با استفاده از شبکه‌ای از جنس مواد مصنوعی، نشان دادند رفتار لرزه‌ای دیوار در وضعیت مرمت و تقویت‌شده بسیار بهبود یافته است. *ایلامپاس*[۷] و همکاران (۲۰۱۳)، روش‌های متداول آسیب‌شناسی و مرمت سازه‌های خشتی دارای ارزش فرهنگی را مرور کردند. آنان کاربردی و مؤثربودن روش‌های مختلف مرمت و مقاوم‌سازی را که درحال‌حاضر از آنها استفاده می‌شود و محققان دانشگاهی آنها را پیشنهاد داده‌اند، از دیدگاه نقادانه مطالعه و کمبودهای این زمینه را مشخص کردند. همچنین مراجع متعددی که دانش و تجربه بین‌المللی را در این زمینه منعکس می‌کند، ارائه نمودند. در ایران، مطالعات علمی درباره مقاوم‌سازی بناهای خشتی پس از به‌وقوع‌پیوستن زلزله بم در سال ۱۳۸۲ به‌صورت جدی شروع شد. در این مطالعات که زیرنظر پروژه نجات‌بخشی میراث فرهنگی ارگ بم و با مشارکت متخصصان ایرانی و خارجی از کشورهایی مانند آلمان، فرانسه و ژاپن انجام گرفت، مرمت برخی از بناهای خشتی مهم ارگ بم مانند خانه سیستانی، برج ۱، برج ۳۲ و بخشی از بازار پس از انجام تحقیقات به‌دست گروه‌های مسئول آغاز شد. هدف آن بود که اثربخشی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی آزمایش شود تا در آینده بتوان از نتایج آنها، دستورالعملی برای مرمت و مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی تهیه نمود (مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک، ۱۳۸۵؛ حجازی، ۱۳۸۹-الف؛ حجازی، ۱۳۸۹-ب؛ (Hejazi et al., 2014 -a; Hejazi et al., 2014 -b; Hejazi et al.,2014-c).

روش پژوهش

روش پژوهش توصیفی– تحلیلی و شیوه گردآوری اطلاعات از گونه کتابخانه‌ای و میدانی است؛ بدین‌ترتیب که درابتدا، کلیه مستندات موجود درباره ارگ بم و بازار و حجره‌های آن شامل کتاب، مقاله، گزارش، عکس و فیلم بررسی و مطالعه شدند و برآن‌اساس، جزئیات تاریخی و معماری بنای موردِنظر ازجمله وضعیت حجره خشتی قبل از زلزله کنکاش گردید. سپس در یک برنامه میدانی و کارگاهی وسیع، باستان‌شناسی بنا به‌منظور تعیین وضعیت اجزای سازه‌ای و لایه‌های تشکیل‌دهنده هر قسمت که شامل پی و خاک زیر آن نیز می‌شد، صورت گرفت و با برداشت دقیق فتوگرامتری وضعیت موجود بنا ثبت و مستندسازی شد. همچنین، آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری حجره انجام گرفت. در ادامه، با نمونه‌برداری از خشت‌های موجود در بنا و انجام آزمایش‌های مکانیکی، خصوصیات و مقاومت‌های مصالح تشکیل‌دهنده تعیین گردیدند. سپس، برمبنای دستورالعمل‌ها و منشورهای مرتبط با مرمت بناهای تاریخی و تکیه بر استفاده از تکنیک‌های بومی مرمت و مصالح بوم‌آورد در دسترس، طرح مقاوم‌سازی پیشنهاد و با نرم‌افزار ANSYS Workbench نسخه ۱۱، مدل‌سازی شد (Zecher & Dadkhah, 2008). برمبنای تحلیل نتایج حاصل از مطالعات کارگاهی و مدل‌سازی و بر اساس اصل حداقل مداخله به‌منظور تأمین مقاومت موردِنظر به‌گونه‌ای که مداخله برگشت‌پذیر باشد، نسبت به انتخاب روش مرمت و مقاوم‌سازی تصمیم‌گیری و طرح مرمت و مقاوم‌سازی تهیه شد.

مراحل طرح مرمت

مبنای تهیه طرح مرمت، منشورها و دستورالعمل‌های جهانی مانند منشور ونیز[۸] (۱۹۶۴) و دستورالعمل‌های ISCARSAH[۹] (2005) بوده است. استفاده از مصالح بادوام و سازگار با نمونه‌های اصلی برای مرمت در این منشورها توصیه شده و مداخله بیش‌ازحد نیاز در مصالح و سازه بنا هم، منع گردیده است. کلیه مداخلات باید برگشت‌پذیر باشد تا بتوان در آینده درصورت نیاز، از مصالح و تکنولوژی جدید استفاده نمود. تأکید این منشورها و دستورالعمل‌ها بر مطالعه و بررسی با حداقل مداخله و رعایت اصالت مصالح، تکنولوژی، گونه‌شناسی و

شرایط محیطی بنا طی عملیات مرمت است. مراحل طرح مرمت حجره خشتی موردِمطالعه، شامل: برداشت وضعیت موجود از لحاظ لایه‌های تاریخی، باستان‌شناسی، بررسی معماری و مستندسازی وضعیت موجود بنا، آسیب‌شناسی، انجام تست‌های آزمایشگاهی روی مصالح، بررسی روش‌های بومی و محلی و مواد در دسترس برای مرمت قسمت‌های پابرجا و نیز بازسازی بخش‌های ازبین‌رفته، انتخاب روش و مصالح مرمت براساس منشورهای بین‌المللی و نتایج تست‌های آزمایشگاهی، آنالیز سازه بنای اصلی به‌منظور ارزیابی میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن، طرح مقاوم‌سازی سازه و ارزیابی آن در زلزله‌های آتی است. تهیه طرح مرمت هم دربردارنده: نقشه‌های مرمت و مقاوم‌سازی قسمت‌های موجود بنا و بازسازی نواحی تخریب‌شده است. مطالب جدول ۱، مراحل طرح مرمت حجره خشتی را نشان می‌دهد (حجازی، ۱۳۸۹- ب). هدف اصلی این طرح، بازگرداندن وضعیت حجره خشتی به شرایط قبل از زلزله و افزایش مقاومت آن درمقابل زلزله‌های آتی است. برای دست‌یابی به این هدف، نواحی مختلفی از سازه تثبیت، تقویت و مرمت و بعضی از قسمت‌های تخریب‌شده به شکل اولیه بازسازی خواهند گردید. مراحل ۲، ۳، ۴، ۹ و ۱۰ از طرح مرمت، درادامه شرح داده خواهند شد.

موقعیت، باستان‌شناسی و آسیب‌شناسی حجره خشتی

- وضعیت اولیه حجره خشتی

حجره موردِنظر در ناحیه جنوب‌غربی ارگ بم و انتهای بازار اصلی قرار گرفته است و دارای پلانی نامنظم با ابعاد تقریبی ۵/۵*۱۰/۵ مترمربع است (تصویر ۲. الف). حجره، سه بخش دارد: ۱. ورودی در جلو (DA09، سمت شرقی)، ۲. اتاق اصلی در وسط (DA08) و ۳. انبار در عقب (DA07، قسمت غربی، تصویر ۲. الف، ب و ج). بنا از خشت با ملات گل و چینه ساخته شده است. محتمل است که در زمان‌های دور هر سه بخش بنا، دارای سقف بوده‌اند (تصویر ۲. د). در تصویر ۲. الف نواحی هاشورخورده، قسمت‌های باقی‌مانده پس از زلزله و نواحی بدون هاشور، قسمت‌های تخریب‌شده را روی پلان بنا نشان می‌دهند.

- حجره خشتی قبل از زلزله

آخرین مرمت اساسی بازار اصلی قبل از زلزله به‌عنوان بخشی از مرمت کل ارگ، در دهه ۱۳۵۰ انجام شد. قبل از زلزله فقط بخش ورودی دارای سقف بود و بخش‌های میانی و انبار بدون سقف بودند (تصویر ۲. ه).

- حجره خشتی بعد از زلزله

حجره خشتی در زلزله دچار آسیب شد. سقف بخش ورودی فروریخت و قسمت‌هایی از دیوارهای دو طرف آن، تخریب شدند. برخی از دیوارهای سایر قسمت‌ها نیز، آسیب دیدند (تصویرهای ۳ و ۴).

- باستان‌شناسی، آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری

تصویرهای ۳، ۴ و ۵ آسیب‌های مختلف واردشده به بنا را در قسمت‌های مختلف، باقی‌مانده‌های سقف در اتاق اصلی (اتاق میانی) و در انبار و نقشه فتوگرامتری سمت شرقی حجره خشتی نشان می‌دهند. بررسی‌های باستان‌شناسی و فتوگرامتری، ضخامت تقریبی دیوارها را در پائین ۰/۷ و در بالا ۰/۵ و ارتفاع آنها را ۲/۵ متر مشخص نموده‌اند. علاوه‌برآن، اشیا و مصالح مختلف غیرساختمانی برای پرنمودن در ضخامت دیوارها دیده شده‌اند که می‌توانند سبب سستی و کاهش در باربری دیوارها گردند (تصویر ۵).

آنالیز سازه‌ای

- روش آنالیز

به‌منظور مطالعه رفتار سازه‌ای حجره خشتی درمقابل زلزله، از آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی به روش المان محدود سه‌بعدی و نرم‌افزار ANSYS Workbench نسخه ۱۱، استفاده شده است (Zecher & Dadkhah, 2008).

برای تعیین ترک‌خوردگی یا خردشدگی در سازه، تنش‌های ایجادشده در قسمت‌های مختلف سازه با مقاومت‌های مصالح، براساس مقادیر جدول ۲، باهم مقایسه شدند.

- بارهای اعمالی به سازه

برمبنای استاندارد ۲۸۰۰ (مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان، ۱۳۸۴)، سه رکورد زلزله مقیاس‌شده جهت آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گرفته و از نتیجه بحرانی‌تر در بررسی‌های سازه استفاده شده است. رکوردهای زلزله موردِمطالعه عبارت‌اند از: رکورد زلزله ۵ دی ۱۳۸۲ بم (مؤلفه شرقی- غربی) به بزرگی ۶/۵ ریشتر (تصویر ۶)، رکورد زلزله ۱۷ فروردین ۱۳۵۶ ناغان به بزرگی ۶ ریشتر و ضریب مقیاس ۰/۸ (تصویر ۷) و رکورد زلزله ۱۸ می ۱۹۴۰ السنترو (مؤلفه شمال- جنوبی) به بزرگی ۷/۱ ریشتر و ضریب مقیاس ۱/۵ (تصویر ۸).

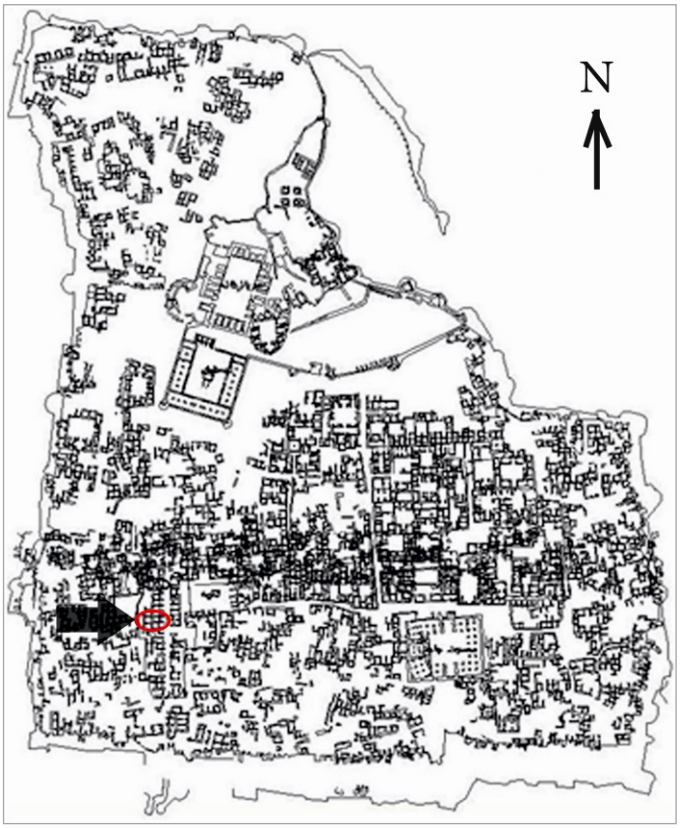
- خصوصیات مصالح

مصالح به‌کاررفته در ساخت سازه حجره شامل خشت و گل و در برخی قسمت‌ها، آمیخته با کاه است. در طرح مرمت از

جدول ۱. مراحل طرح مرمت حجره خشتی

مرحله	شرح عملیات انجام‌گرفته روی بنا
۱	بررسی تاریخی
۲	بررسی باستان‌شناسی
۳	بررسی معماری و مستندات موجود درباره شرایط فعلی
۴	آسیب‌شناسی
۵	تست‌های آزمایشگاهی برای تعیین خواص مکانیکی مصالح موجود
۶	بررسی تکنیک‌های بومی و محلی برای مرمت
۷	بررسی مواد در دسترس مانند: خاک، خشت و الیاف درخت خرما به‌منظور ترمیم بخش‌های موجود و بازسازی نواحی تخریب‌شده
۸	انتخاب روش و مصالح مرمت بر اساس منشورهای بین‌المللی و نتایج تست‌های آزمایشگاهی
۹	آنالیز سازه‌ای بنای اصلی برای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن
۱۰	طرح مقاوم‌سازی سازه و ارزیابی آن در آنالیزهای سازه‌ای
۱۱	طراحی سقف تخریب‌شده بخش ورودی بنا براساس فُرم اولیه آن قبل از تخریب در زلزله
۱۲	تهیه نقشه‌های مرمت و مقاوم‌سازی قسمت‌های موجود بنا و بازسازی نواحی تخریب‌شده
۱۳	پایان بررسی‌ها و تحقیقات
۱۴	اجرای طرح مرمت، بازسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای

(نگارندگان)



تصویر ۱. پلان ارگ تاریخی بم (موقعیت حجره خشتی با پیکان مشخص شده است)، (پایگاه نجات‌بخشی ارگ بم، ۱۳۸۶- الف)

المان‌های چوبی بهره گرفته شده است. خصوصیات مکانیکی مصالح خشتی نشان‌داده‌شده در جدول ۲، از مطالعات جامع و نتایج آزمایشگاهی روی بلوک‌های خشتی ارگ حاصل شده است (پایگاه نجات‌بخشی ارگ بم، ۱۳۸۶ - ب). دیاگرام تنش- کرنش خشت ارائه‌شده در تصویر ۹، از نتایج آزمایشگاه ارگ بم به‌دست آمده که به‌دلیل قرارنگرفتن نقطه صفر در مرکز مختصات، براساس اصول مقاومت مصالح اصلاح گردیده است. مشخصات دینامیکی به‌کاررفته در آنالیزهای لرزه‌ای و خصوصیات مکانیکی مصالح چوبی به‌ترتیب، در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

جدول ۲. خصوصیات مکانیکی خشت

وزن مخصوص (kg/m^3)	۱۸۰۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۱۰۵
ضریب پواسون	۰/۱۷
مقاومت فشاری (MPa)	۰/۳۶
مقاومت کششی (MPa)	۰/۰۳۶
مقاومت خردشدگی (MPa)	۰/۴۵
مقاومت ترک‌خوردگی (MPa)	۰/۰۴۵
ضریب اصطکاک بین دو سطح خشتی	۰/۲

(حجازی، ۱۳۸۹- ب؛ پایگاه نجات‌بخشی ارگ بم، ۱۳۸۶؛ Hejazi, 1997؛ Hejazi et al., 2014 -b)

مدل‌های بررسی‌شده

- بدون تقویت

همان وضعیت سازه قبل از زلزله است. همان‌طورکه پلان سازه در تصویر ۱۰. الف مشاهده می‌شود، دیوارهای سازه اکثراً دارای ضخامت و راستای یکسان و ثابتی نیستند. همین‌طور موقعیت نامتقارن بازشوها و نبود عنصری مقاوم دربرابر بارهای جانبی، می‌تواند مشکل‌ساز باشد.

جدول ۳. خصوصیات دینامیکی به‌کاررفته در آنالیزها

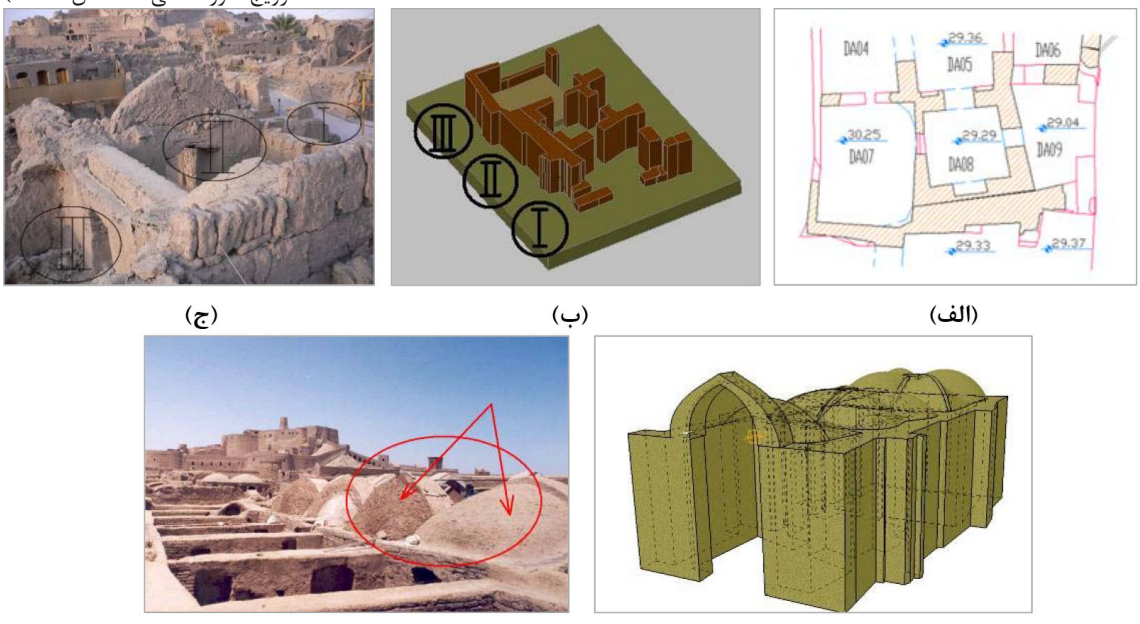
نوع آنالیز دینامیکی	تاریخچه زمانی
درصد میرایی	۷
شتاب گرانش زمین (m/s^2)	۹/۸۱

(حجازی، ۱۳۸۹- ب)

جدول ۴. خصوصیات مکانیکی چوب

وزن مخصوص (kg/m^3)	۶۰۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۸۰۰
ضریب پواسون	۰/۴۷
تنش تسلیم فشاری (MPa)	۳
تنش تسلیم کششی (MPa)	۶

(دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۵؛ دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۷)



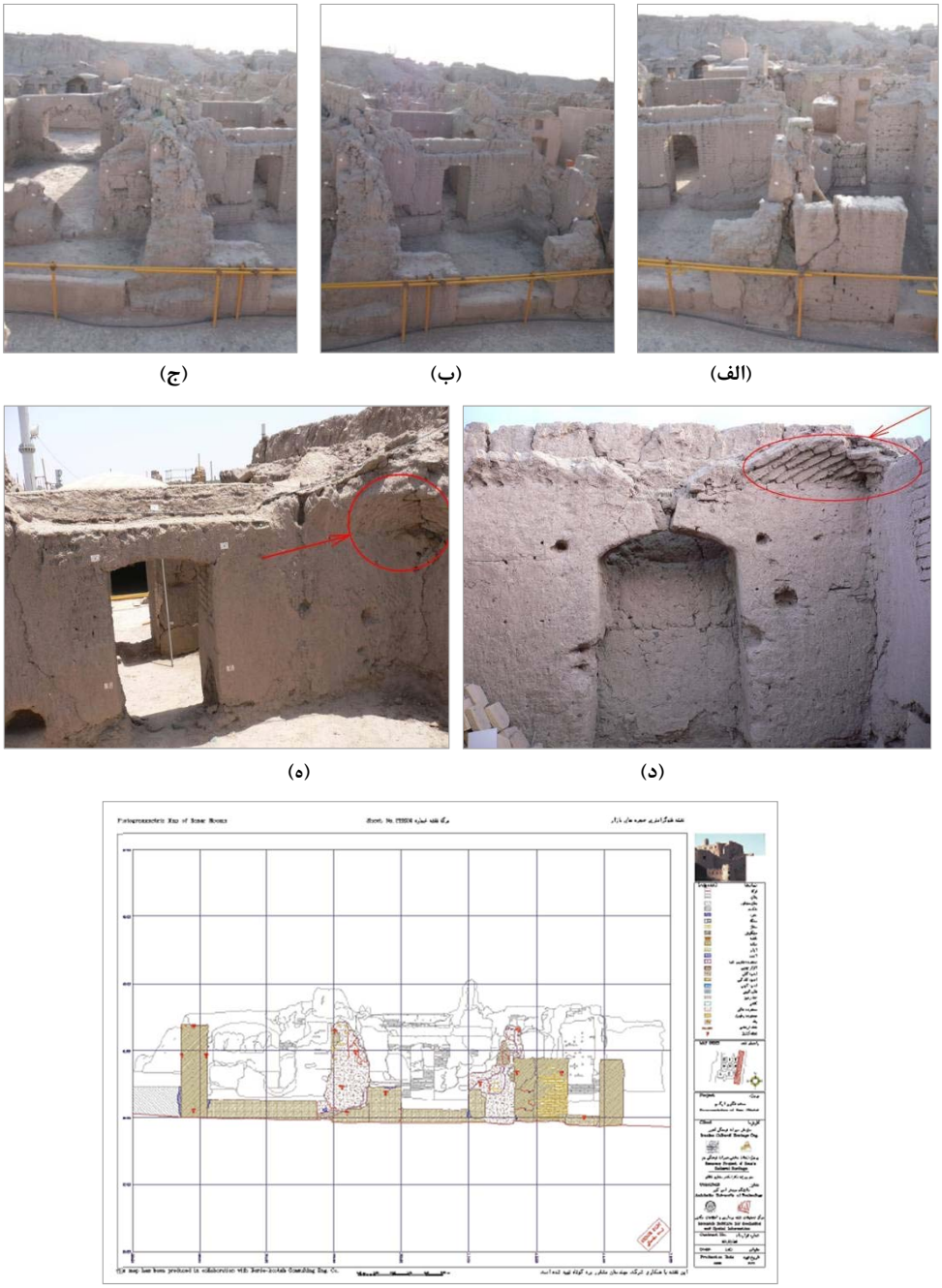
(الف) (ب) (ج)

(د) (ه)

تصویر ۲. الف. پلان حجره خشتی: DA09 = ورودی، DA08 = اتاق اصلی، DA07 = انبار، ب. سه فضای حجره خشتی: I = ورودی، II= اتاق اصلی، III = انبار، ج. سه فضای حجره خشتی، د. وضعیت اولیه احتمال‌داده‌شده حجره خشتی، ه. وضعیت حجره خشتی قبل از زلزله (نگارندگان)

- تقویت‌شده

ازلحاظ هندسی، به‌جز افزودن تعدادی المان چوبی در گوشه‌های دیوارها (تصویر ۱۱) و برخی بازشوها به‌صورت قائم و اتصال آنها در ناحیه بالایی دیوار با کلافی افقی- چوبی، تفاوت دیگری با مدل تقویت‌نشده ندارد. علت افزودن المان‌های چوبی (کلاف‌های قائم و افقی)، جلوگیری از افزایش تنش در دیوارهای خشتی با انتقال بخشی از نیروی زلزله به درون این المان‌ها و افزایش انسجام دیوارها است. المان‌های قائم دارای مقطع مربعی ۰/۲×۰/۲ مترمربع و ارتفاع ۲/۵ متر هستند به‌گونه‌ای‌که، در کل ارتفاع دیوار کشیده شده‌اند و به‌منظور تأمین گیرداری به اندازه ۰/۸ متر، در داخل زمین فرومی‌روند.

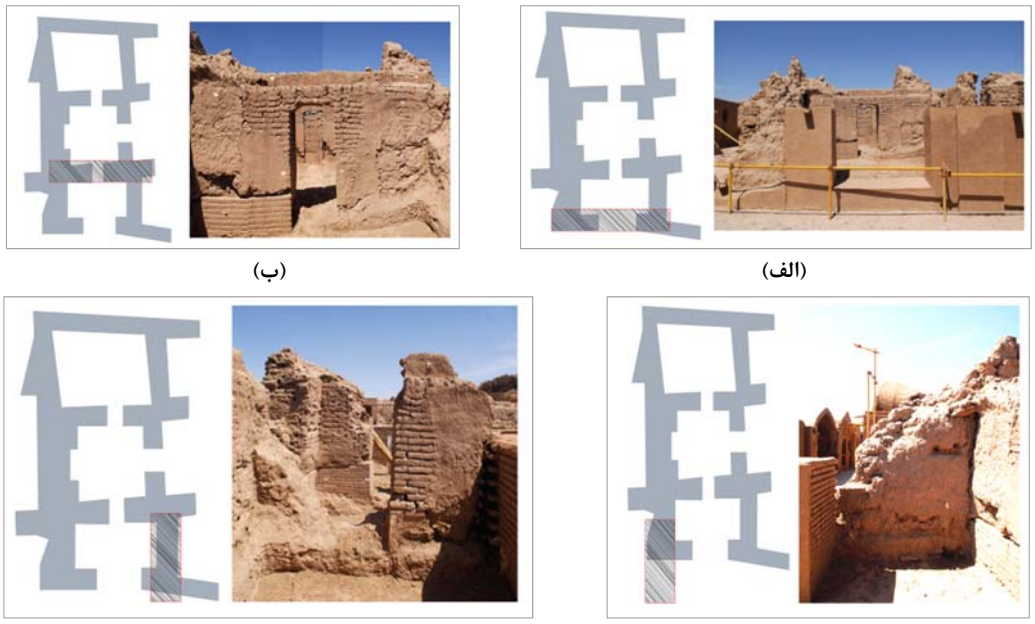


(الف) (ب) (ج)

(د) (ه)

(و)

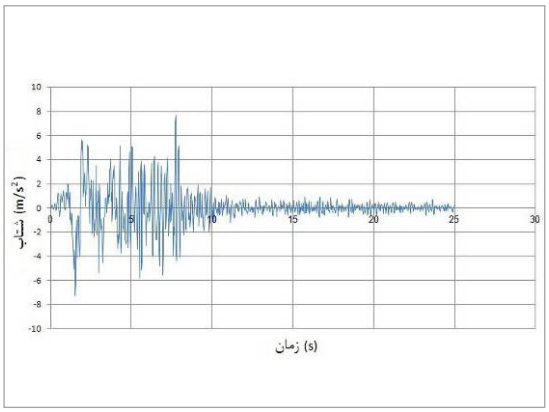
تصویر ۳. حجره خشتی پس از زلزله: الف. دیوار مشترک با حجره خشتی شمالی مجاور ب. حجره خشتی ج. دیوار مشترک با حجره خشتی جنوبی مجاور د. باقی‌مانده‌های سقف در اتاق اصلی (میانی) ه. باقی‌مانده‌های سقف در انبار و. نقشه فتوگرامتری سمت شرقی حجره خشتی (نگارندگان)



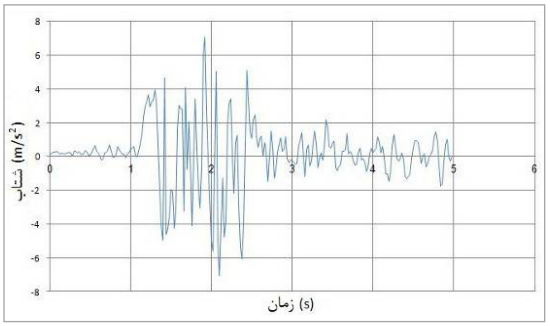
تصویر ۴. وضعیت داخلی دیوارهای بخش ورودی حجره: الف. دیوار شرقی ب. دیوار غربی ج. دیوار جنوبی د. دیوار شمالی (نگارندگان)



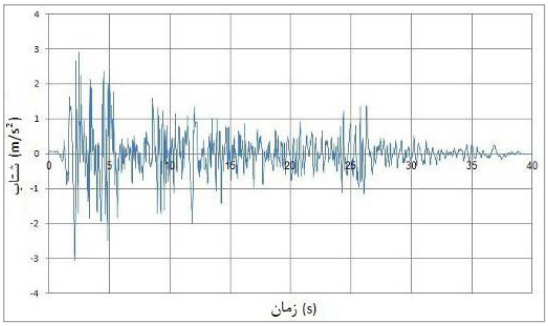
تصویر ۵. مصالح غیرسازه‌ای (کوزه‌ای سفالی) داخل یکی از دیوارهای حجره خشتی (نگارندگان)



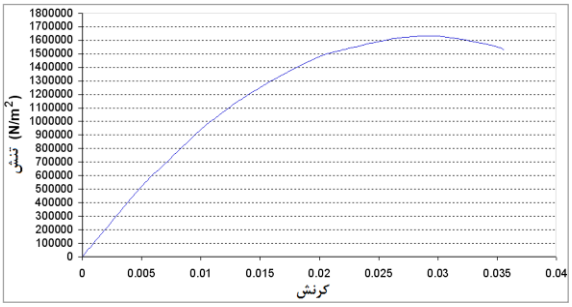
تصویر ۶. رکورد زلزله ۱۳۸۲ بم (مؤلفه شرقی- غربی)، (Silva, 2012)



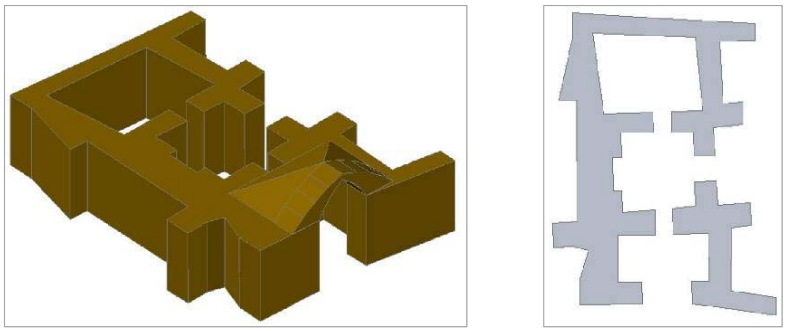
تصویر ۷. رکورد اصلاح‌شده زلزله ۱۳۵۶ ناغان (ضریب مقیاس ۰/۸)، (Silva, 2012)



تصویر ۸. رکورد اصلاح‌شده زلزله ۱۹۴۰ السنترو (مؤلفه شمالی- جنوبی و ضریب مقیاس ۱/۵)، (Silva, 2012)

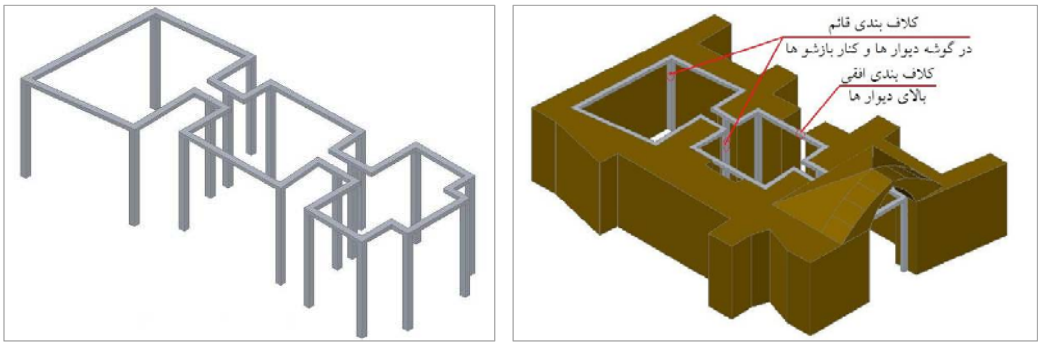


تصویر ۹. دیاگرام تنش- کرنش اصلاح‌شده خشت‌های قدیمی در ارگ بم (نگارندگان)



(ب) (الف)

تصویر ۱۰. مدل بدون تقویت: الف. پلان ب. وضعیت سه‌بعدی (نگارندگان)



(ب) (الف)

تصویر ۱۱. الف. مدل تقویت‌شده با المان‌های قائم و افقی- چوبی ب. وضعیت سه‌بعدی کلاف‌بندی قائم و افقی (نگارندگان)

المان‌های افقی- چوبی نیز، دارای همان مقطع بوده و رأس المان‌های قائم را در تراز روی دیوار به‌هم متصل می‌کنند.

نتایج آنالیزها

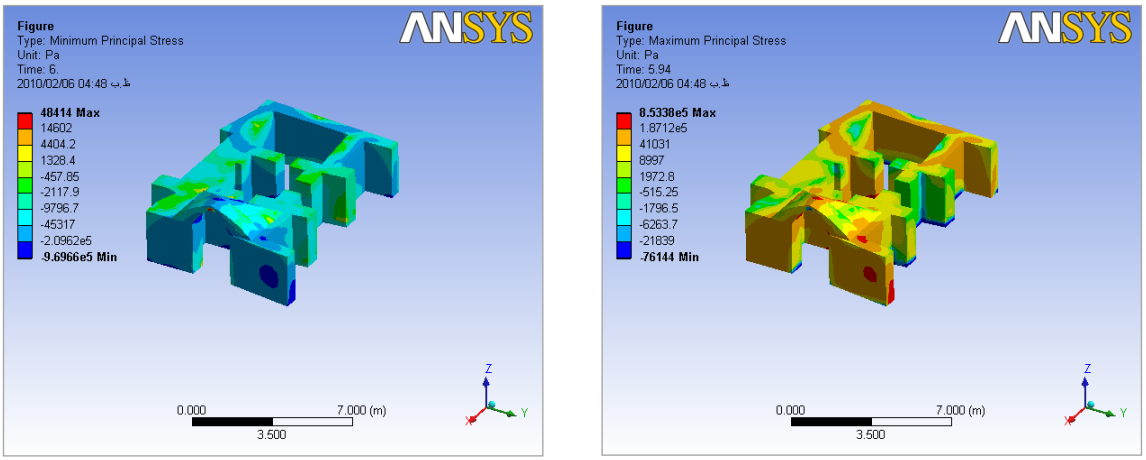
نتایج حاصل از آنالیزها برای سازه تقویت‌نشده در تصویرهای ۱۷-۱۲ و جدول ۵ و برای سازه تقویت‌شده در تصویرهای ۱۸ و ۱۹ و جدول ۶ آورده شده‌اند. تنش و تغییر شکل در زمان مشخصی که مقدار حداکثر خود را در کل زمان زلزله داشته‌اند، نشان داده شده‌اند.

- آنالیز سازه‌ای تقویت‌نشده

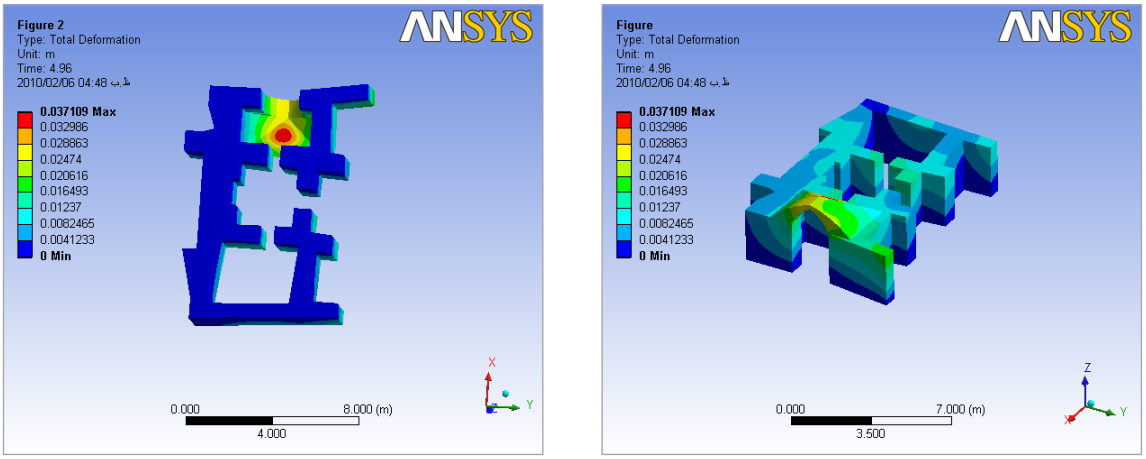
چنانچه از تصویرهای ۱۷-۱۲ و جدول ۵ مشخص است، سازه حجره خشتی درمقابل هر سه زلزله دچار آسیب می‌شود. میزان خرابی‌ها دربرابر زلزله‌های بم و ناغان شدید و دربرابر زلزله السنترو متوسط تا کم است.

- آنالیز سازه‌ای تقویت‌شده

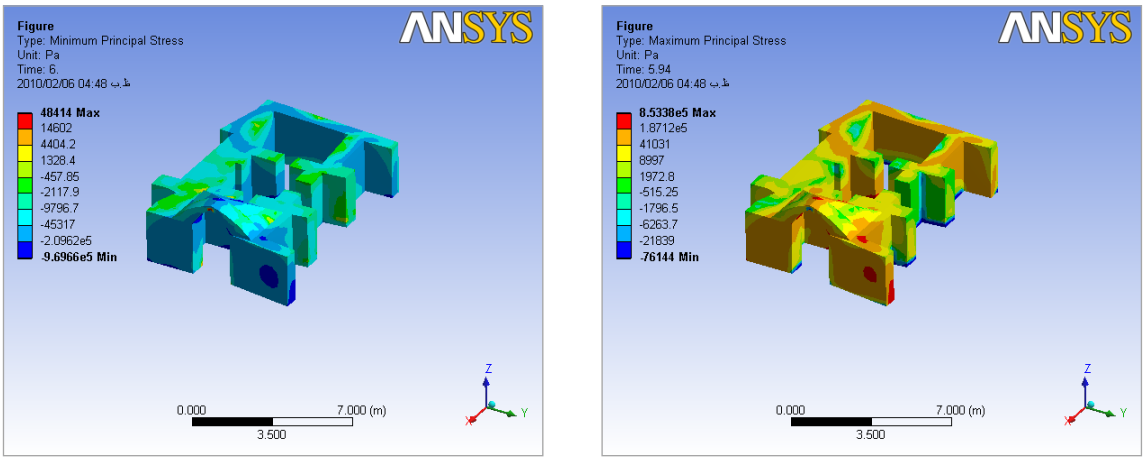
زلزله بم باعث بحرانی‌ترین حالت تنش و تغییر مکان نسبت به زلزله‌های ناغان و السنترو می‌شود. براساس تصویرهای ۱۸ و ۱۹ و جدول ۶، با تقویت‌نمودن سازه حجره خشتی با المان‌های چوبی قائم و افقی، رفتار سازه بهبود چشمگیری کرده است. هیچ قسمت از سازه خشتی دچار تخریب نمی‌شود. تنها قسمت



تصویر ۱۲. سازه تقویت‌نشده: الف. کانتور تنش کششی ماکزیمم در زمان S ۵/۹۴ ب. کانتور تنش فشاری ماکزیمم در زمان S ۶ تحت زلزله بم (نگارندگان)



تصویر ۱۳. سازه تقویت‌نشده، کانتور تغییر شکل سازه در زمان S ۴/۹۶ تحت زلزله بم (نگارندگان)



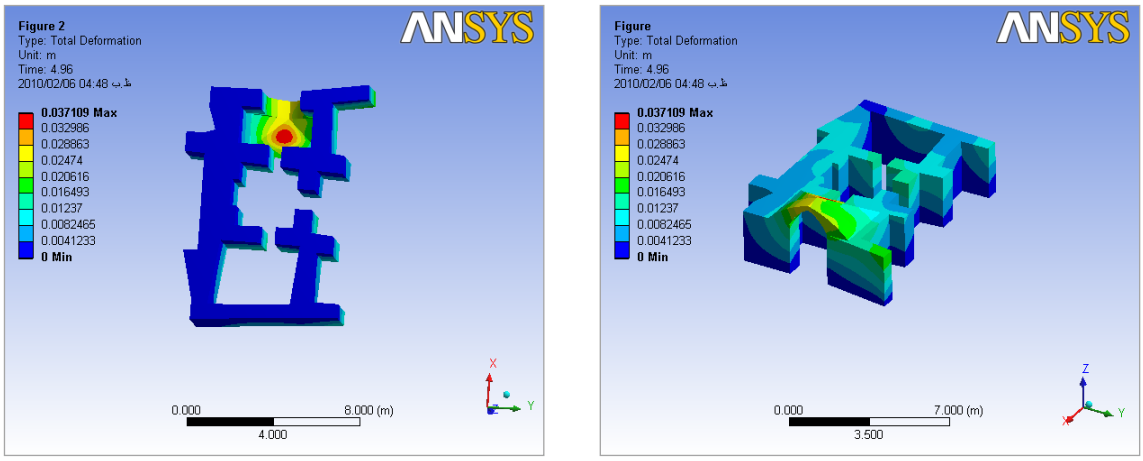
تصویر ۱۴. سازه تقویت‌نشده: الف. کانتور تنش کششی ماکزیمم در زمان S ۵/۹۴ ب. کانتور تنش فشاری ماکزیمم در زمان S ۶ تحت زلزله ناغان (نگارندگان)

آسیب‌پذیر مربوط به ناحیه پائین المان‌های چوبی در محل اتصال به زمین است که درصورت صدمه‌دیدن، می‌توان آن را تعویض کرد.

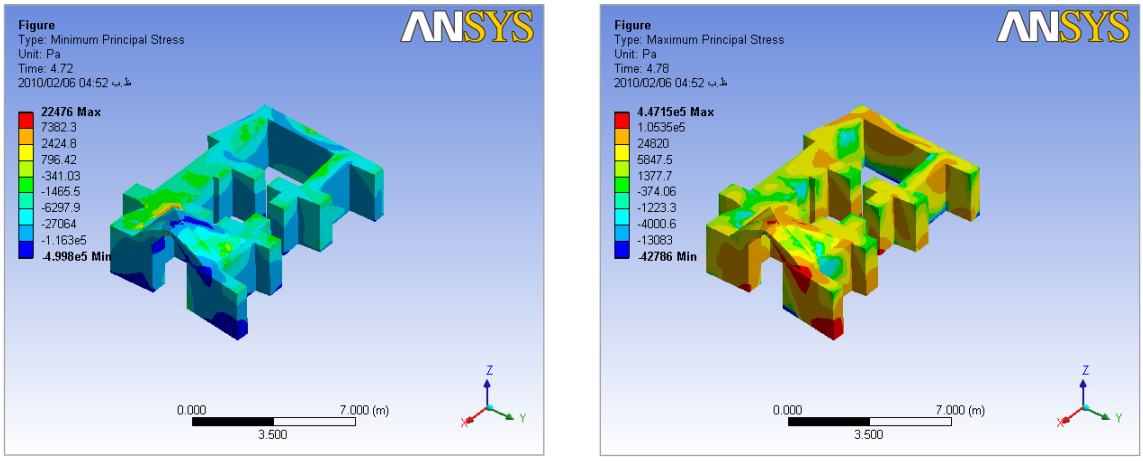
طرح مرمت و مقاوم‌سازی

براساس نتایج حاصل از مطالعات کارگاهی، باستان‌شناسی، آسیب‌شناسی و آنالیزهای انجام‌شده روی سازه حجره خشتی، مواردی برای مرمت این بنا پیشنهاد می‌گردد:

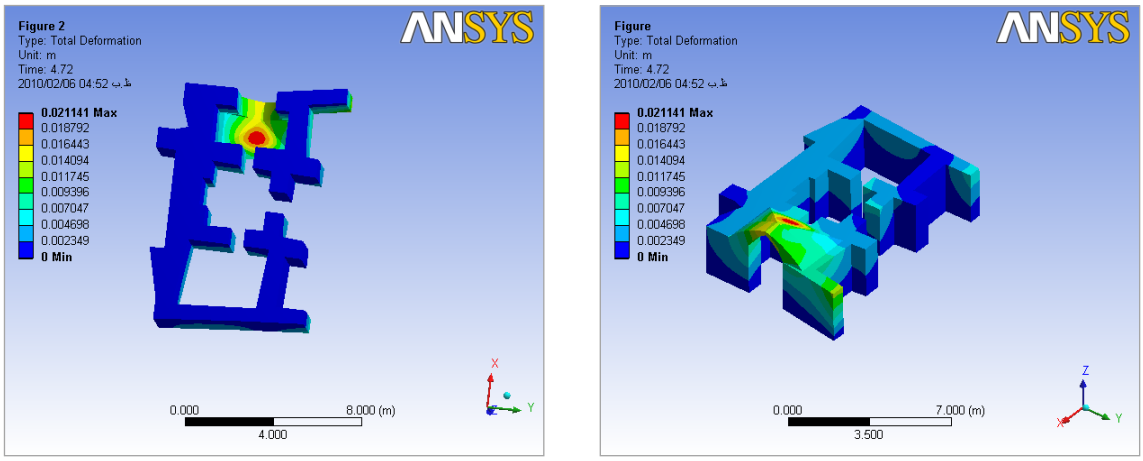
- سازه باید با افزودن المان‌های چوبی (کلاف‌های چوبی) قائم در گوشه‌های دیوارها و لبه بازشوها و اتصال افقی آنها توسط المان‌های چوبی مشابه در تراز بالایی دیوارها مطابق تصویر ۲۰، تقویت شود. تصویر ۲۱، طرح شماتیک یکی از المان‌های قائم (کلاف قائم) چوبی است. به‌منظور



تصویر ۱۵. سازه تقویت‌نشده، کانتور تغییر شکل سازه در زمان S ۴/۹۶ تحت زلزله ناغان (نگارندگان)



تصویر ۱۶. سازه تقویت‌نشده: الف. کانتور تنش کششی ماکزیمم در زمان S ۴/۷۸ ب. کانتور تنش فشاری ماکزیمم در زمان S ۴/۷۲ تحت زلزله السنترو (نگارندگان)



تصویر ۱۷. سازه تقویت‌نشده، کانتور تغییر شکل سازه در زمان S ۴/۷۲ تحت زلزله السنترو (نگارندگان)

ایجاد درگیری المان‌های چوبی با دیوارها و خاک، باید از زائده‌هایی مانند میخ‌های چوبی یا فولادی با فواصل حداکثر ۲۵ سانتی‌متر استفاده گردد. همچنین، برای جلوگیری از پوسیدگی و حمله حشرات، بهتر است از چوب کاج آغشته به گازوئیل و رنگ‌شده استفاده شود.

- ترک‌های دیوارها باید با تزریق دوغاب مناسب تثبیت شوند. دوغاب مناسب که براساس تحقیق و آزمایش طراحی شده است، باید از ۱۵ تا ۲۵ % ماسه، ۱۰ تا ۲۰ % گچ، ۲۵ % آهک و ۴۰% خاکستر بادی تشکیل شده باشد (مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک، ۱۳۸۵).
- اشیا و مواد غیربابر که در برخی از نواحی دیوارها جایگذاری شده‌اند، باید خارج شوند.

جدول ۵. خلاصه نتایج آنالیزهای صورت‌گرفته روی مدل تقویت‌نشده سازه حجره خشتی تحت زلزله‌های بم، ناغان و السنترو

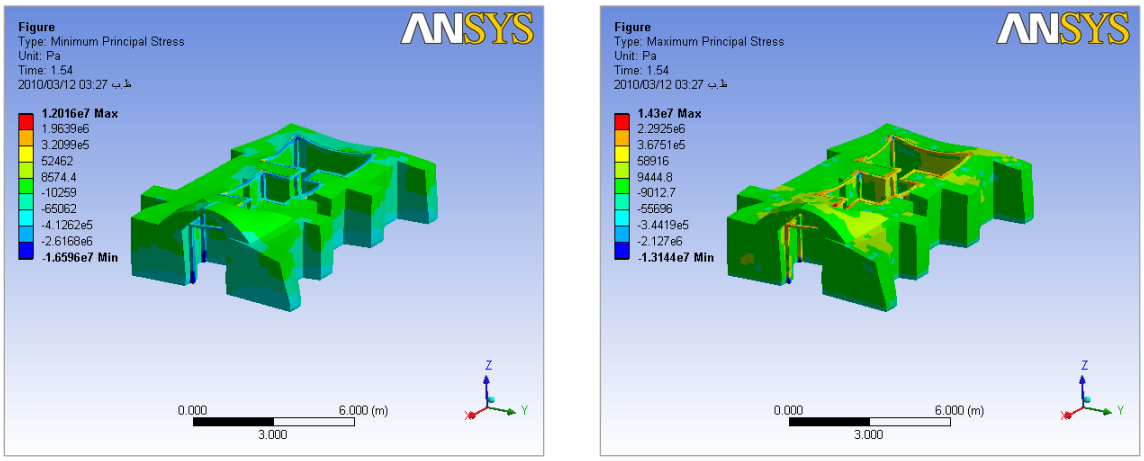
پارامتر موردِبررسی / زلزله	تنش کششی حداکثر در سازه درطول مدت زلزله (MPa)	تنش فشاری حداکثر در سازه درطول مدت زلزله (MPa)	حداکثر جابه‌جایی در سازه درطول مدت زلزله (m)	توضیحات
بم	۰/۸۵	۰/۹۷	۰/۰۳۷	تنش‌های کششی و فشاری در بسیاری از قسمت‌های سازه از حد تحمل سازه خارج شده‌اند. این حالت، بیانگر ترک‌خوردگی‌های گسترده و خردشدگی در نواحی نزدیک لبه بازشوها است. همین‌طور، تغییر شکل زیاد رخ‌داده در سقف سازه پتانسیل بالای تخریب را در این قسمت از سازه نشان می‌دهد. درکل، می‌توان وضعیت سازه را در این حالت بحرانی و با خرابی‌های شدید اعلام نمود.
ناغان	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۰۳۷	تنش‌های کششی و فشاری در بسیاری از قسمت‌های سازه از حد تحمل سازه خارج شده که بیانگر ترک‌خوردگی‌های گسترده و خردشدگی در نواحی نزدیک لبه بازشوها است. همین‌طور، تغییر شکل زیاد رخ‌داده در سقف سازه، پتانسیل بالای تخریب را در این قسمت از سازه نشان می‌دهد. درکل، می‌توان وضعیت سازه را در این حالت بحرانی و با خرابی‌های شدید اعلام نمود.
السنترو	۰/۴۵	۰/۵	۰/۰۲۱	تنش فشاری در این حالت نزدیک مقاومت فشاری مصالح است ولی تنش کششی همچنان بیشتر از حد تحمل سازه است. بااین‌حال، به دلیل آن که وسعت نواحی با تنش کششی بیش از حد، در سازه کمتر از دو زلزله دیگر است، می‌توان انتظار خسارت‌های کمتری را داشت. میزان تغییر شکل حداکثر سازه نیز که در سقف رخ داده، تاحدود زیادی بهتر است. درکل، وضعیت سازه نیمه‌بحرانی و میزان خرابی‌ها درحدود متوسط و کم است.

(نگارندگان)

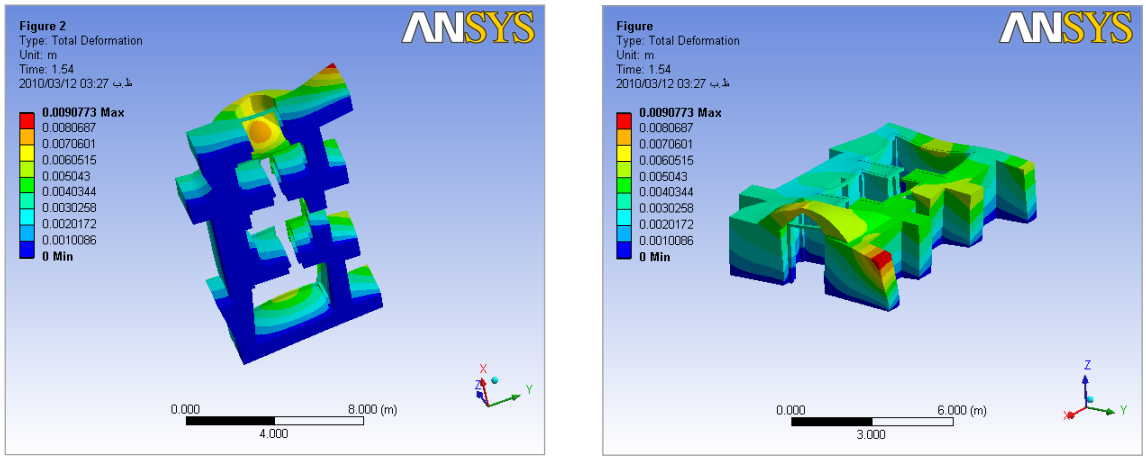
جدول ۶. خلاصه نتایج آنالیز صورت‌گرفته روی مدل تقویت‌شده سازه حجره خشتی تحت زلزله بم

پارامتر موردِبررسی		تنش کششی حداکثر در سازه درطول مدت زلزله (MPa)	تنش فشاری حداکثر در سازه درطول مدت زلزله (MPa)	حداکثر جابجایی در سازه درطول مدت زلزله (m)	توضیحات
زلزله	محل وقوع				
بم	در خشت	۰/۰۴۳	۰/۴۱	۰/۰۰۹	وضعیت تنش‌ها در مصالح خشتی مناسب است. تنش در المان‌های چوبی به‌جز قسمتی از کلاف افقی بین اتاق‌های ورودی و میانی (در ناحیه درگاه)، کششی است. نواحی پائینی کلاف‌های قائم دچار تنش فشاری زیاد شده‌اند که به‌دلیل تمرکز تنش در نواحی تیز گوشه یا نزدیک تکیه‌گاه است. اندازه تغییر شکل حداکثر سازه نیز که در گوشه دیوار شرقی رخ داده، کم و قابل چشم‌پوشی است. درکل، وضعیت سازه مناسب و احتمال خرابی ضعیف است.
	در چوب	۱۴/۳	۱۶/۶	-	

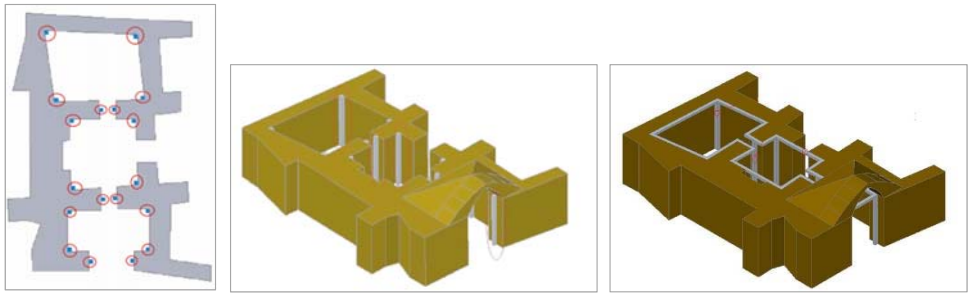
(نگارندگان)



تصویر ۱۸. سازه تقویت‌شده: الف. کانتور تنش کششی ماکزیمم در زمان S ۱/۵۴ ب. کانتور تنش فشاری ماکزیمم در زمان S ۱/۵۴ تحت زلزله ناغان (نگارندگان)



تصویر ۱۹. سازه تقویت‌شده، کانتور تغییر شکل سازه در زمان S ۱/۵۴ تحت زلزله بم (نگارندگان)

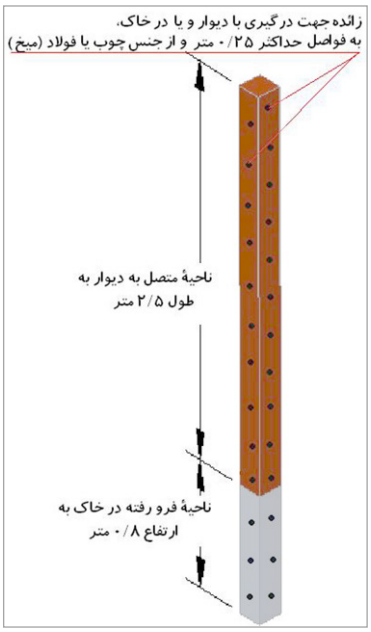


تصویر ۲۰. وضعیت قرارگیری کلاف‌های افقی و قائم چوبی در گوشه دیوارها، کنار بازشوها، دور سقف‌ها و پلان (نگارندگان)

- قسمت‌هایی از دیوارها که شکسته یا به‌گونه‌ای کج شده‌اند و امکان نگهداری آنها وجود ندارد، باید بر اساس وضعیت اولیه‌شان بازسازی شوند.
- مرمت سمت شرقی ورودی و درامتداد بازار که قسمتی از آن انجام شده است، باید تکمیل گردد (تصویر ۴. الف). برای سمت غربی ورودی باید مصالح فرسوده تعویض گردند؛ یک پی به زیر دیوار اضافه شود و قوس آن مرمت شود (تصویر ۴. ب). در سمت جنوبی ورودی باید یک پی به زیر دیوار اضافه شود، مصالح فرسوده تعویض گردند و قسمت‌هایی که دیگر موجود نیستند، بازسازی شوند و با اتصالات مطمئن به قسمت‌های پابرجا متصل گردند (تصویر ۴. ج). دیوار سمت شمالی ورودی متلاشی، شکسته و کج شده است. این دیوار باید با احتیاط کامل تثبیت و درصورت امکان‌پذیرنبودن تثبیت، بازسازی گردد (تصویر ۴. د).
- سمت غربی اتاق میانی تقریباً بدون آسیب است و فقط گوشه جنوبی و دیوار سمت شمالی این اتاق، به پی‌بندی

نیاز دارد. ترک ایجادشده در قوس بادگیر باید مرمت شود (تصویر ۳. د). سمت جنوبی اتاق میانی حرکت کرده و از قسمت قدیمی‌تر سازه جدا شده است. این قسمت نیازمند پی‌بندی و مرمت است. فضای پشت قوس که از پشت آن باد از بادگیر وارد اتاق می‌شده است، صدمه دیده و باید مرمت گردد. به‌دلیل اینکه مستنداتی از شکل اولیه بادگیر دردست نیست، امکان خواناسازی و مرمت آن وجود ندارد و تنها شواهد آن حفظ می‌شود.

- سمت شرقی انبار حجره از مصالح چینه بوده و تنها یک ردیف از چینه‌های بالای دیوار دراثر زلزله تخریب شده است که پیشنهاد می‌شود با همان مصالح چینه دوباره مرمت گردد. سمت‌های جنوبی و غربی انبار حجره سالم باقی مانده و دراثر زلزله آسیب ندیده‌اند. به‌نظر می‌رسد، آسیب وارده به سمت شمالی انبار حجره دراثر زلزله نباشد بلکه در دوره‌ای دیوار بریده شده و دسترسی به فضای کناری ایجاد شده که زمان و دلیل آن نامشخص است. پیشنهاد می‌شود، دوباره ساختار به وضعیت اولیه برگردانده شود. شواهدی از آثار سقف در گوشه‌های اتاق میانی و انبار دیده می‌شود (تصویر ۳. د و ه) اما در عکس های قبل از زلزله نیز آثاری از کامل بودن سقف در این فضا دیده نمی شود. باتوجه‌به اینکه، هدف از انجام این طرح بازگرداندن وضعیت حجره خشتی به شرایط قبل از زلزله است، سقف انبار و سقف اتاق میانی به بازسازی نیاز ندارند.



تصویر ۲۱. المان‌های چوبی تقویتی قائم به مقطع ۰/۲×۰/۲ مترمربع و ارتفاع کل ۳/۳ متر (نگارندگان)

نتیجه‌گیری

مطالعات کارگاهی، تاریخی، باستان‌شناسی، آسیب‌شناسی، تست‌های آزمایشگاهی، بررسی تکنیک‌های بومی و محلی برای مرمت، بررسی مصالح در دسترس، آنالیزهای سازه‌ای انجام‌شده و سایر فعالیت‌های انجام‌گرفته در تهیه طرح مرمت یک حجره خشتی در بازار اصلی ارگ بم و اطلاعات به‌دست‌آمده، بیانگر آن است که این حجره را می‌توان با حداقل مداخلات به‌صورت برگشت‌پذیر و حفظ اصالت آن، به‌نحو مؤثری مرمت کرد. نتایج حاصل از این مطالعات حاکی از عملکرد ضعیف سازه تقویت‌نشده و رفتار قابل قبول سازه تقویت‌شده درمقابل زلزله است. سازه تقویت‌نشده دربرابر زلزله‌های محتمل منطقه دچار خسارت و خرابی می‌شود. این درحالی است که تنها با افزودن تعدادی المان چوبی در گوشه دیوارها و لبه بازشوها و اتصال افقی آنها در تراز سقف، با حداقل مداخله و برگشت‌پذیربودن آن، خرابی در سازه خشتی حذف می‌گردد و رفتار سازه تاحد چشمگیری بهبود می‌یابد. سایر قسمت‌های بنا را می‌توان با تزریق دوغاب مناسب، ایجاد اتصالات ازبین‌رفته، پی‌بندی و درمواردی، بازسازی‌های جزئی مرمتی نمود و بنا را به وضعیت قبل از زلزله با مقاومتی بیشتر در برابر زلزله‌های آتی بازگرداند.

سپاس‌گزاری

این کار با حمایت مالی حاصل از قرارداد شماره ۸۷/۲۳۶۳۸ مورخ ۱۳۸۷/۴/۲۳ بین دانشگاه اصفهان (به‌عنوان مؤسسه پژوهشی) و پروژه نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم (سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور، به‌عنوان کارفرما)، با موضوع پروژه مرمت و بازسازی یک حجره خشتی در بازار ارگ بم با شماره ثبت ۲۳۳۳ با استفاده از تسهیلات بند "د" ماده ۴۵ قانون برنامه چهارم توسعه کشور، انجام شده است.

پی‌نوشت

1. Corazao, M. &, Blondet, M.
2. Blondet, M. & Vargas, J.
3. Noguez, R. & Navarro, S.
4. Zavala, C. & Igarashi, L.
5. Yamin
6. Figueiredo
7. Illampas
8. The Venice Charter
9. The Barcelona Charter

منابع و مآخذ

- پایگاه نجات‌بخشی ارگ بم (۱۳۸۶- الف). **گزارش‌ها و مقالات باستان‌شناسی و وضعیت شناسی**. بم: سازمان میراث فرهنگی، گردشگری و جهانگردی.
- _____ (۱۳۸۶- ب). **نتایج آزمایشگاه مواد و مصالح**. بم: سازمان میراث فرهنگی، گردشگری و جهانگردی.
- حجازی، سید امیرمهرداد (۱۳۸۹- ب). **پروژه مطالعه و آسیب‌شناسی دیوار شمالی و ارائه طرح مرمت برج ۳۲**. گزارش نهایی، اصفهان و بم: دانشگاه اصفهان، سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور.
- _____ . **مرمت و بازسازی یک حجره خشتی در بازار ارگ بم**. گزارش نهایی، اصفهان و بم: دانشگاه اصفهان، سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور.
- دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۸۵). **مبحث ششم از مقررات ملی ساختمان ایران، بارهای وارد بر ساختمان**. چاپ اول، تهران: توسعه ایران.
- _____ (۱۳۸۷). **راهنمای قالب‌بندی ساختمان‌های بتن آرمه**. چاپ پنجم، تهران: توسعه ایران.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۴). **آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها دربرابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰**. ویرایش سوم، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک (۱۳۸۵). **استحکام‌بخشی و دوخت‌ودوز سازه‌های خشتی ارگ بم**. گزارش‌های ۳-۱، تهران: مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک.

- Blondet, M. & Vargas, J. (1978). Investigaciones Sobre Vivienda Rural. Lima: Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción/Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Blondet, M.; Torrealva, D.; Garcia, G.; Ginocchio, F. & Madueño, I. (2005). Using Industrial Materials for the Construction of Safe Adobe Houses in Seismic Areas. In: **International Conference Earth Build 200**5. University of Technology, Sydney .
- Corazao, M. & Blondet, M. (1973). Estudio Experimental del Comportamiento Estructural de las Construcciones de Adobe Frente a Solicitaciones Sísmicas. Banco Peruano de los Constructores. Departamento de Ingenieria, Universidad Católica del Perú, Lima .
- Figueiredo, A.; Varum, H.; Costa, A.; Silveira, D. & Oliveira, C. (2013). Seismic Retrofitting Solution of an Adobe Masonry Wall. **Materials and Structures,** 46(1-2): 203-219.
- Hejazi, M. (1997). **Historical Buildings of Iran: Their Architecture and Structure.** Southampton and Boston: Computational Mechanics Publications (WIT Press).

- Hejazi, M. & Mehdizadeh Saradj, F. (2014 a). Persian Architectural Heritage: Architecture. Southampton and Boston: WIT Press.
- Hejazi, M. & Mehdizadeh Saradj, F. (2014 a). Persian Architectural Heritage: Conservation. Southampton and Boston: WIT Press.
- Hejazi, M. & Mehdizadeh Saradj, F. (2014 b). Persian Architectural Heritage: Structure. Southampton and Boston: WIT Press.
- Illampas, O.; Ioannou, I. & Charmpis, D. C. (2013). Overview of the Pathology, Repair and Strengthening of Adobe Structures. **International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration,** 7(2): 165-188.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (1964). International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (the Venice Charter 1964). Paris .
- International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage (ISCARSAH). (2005). Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage (the Barcelona Charter 2005). Paris .
- Leroy Tolles, E.; Kimbro, E. E. & Ginell, W. S. (2002). **Planning and Engineering Guidelines for the Retrofitting of Historic Adobe Structures.** Los Angeles: J. Paul Getty Trust.
- Leroy Tolles, E.; Kimbro, E. E.; Webster, F. A. & Ginell, W. S. (2000). **Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures: Final Report of the Getty Seismic Adobe Project.** Los Angeles: J. Paul Getty Trust.
- Noguez, R. & Navarro, S. (2005). Reparación de Muros de Adobe Com el Uso de Mallas Sintéticas: **International Conference SismoAdobe 2005: Architecture, Construction and Conservation of Earthen Buildings in Seismic Areas**. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima .
- Silva, W. (2012). Strong Motion Database. California: http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html.
- Vargas, J.; Blondet, M.; Ginocchio, F. & García, G. (2005). 35 Años de Investigaciones en Sismo Adobe: la Tierra Armada. **International Conference SismoAdobe 2005: Architecture, Construction and Conservation of Earthen Buildings in Seismic Areas.** Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima .
- Yamin, L.; Phillips, C.; Reyes, J.; Rivero, S. & Ruiz, D. (2007). Estudios de Vulnerabilidad Sísmica, Rehabilitación y Refuerzo de Casas en Adobe y Tapia Pisada: Revista de Estudios sobre Património. **Journal of Cultural Heritage Studies .**
- Zavala, C. & Igarashi, L. (2005). Propuesta de Reforzamiento para Muros de Adobe. In: International Conference SismoAdobe 2005: Architecture, Construction and Conservation of Earthen Buildings in Seismic Areas. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima .
- Zecher, J. & Dadkhah, F. (2008). **ANSYS Workbench Software Tutorial with Multimedia CD Release 11.** New York: Schroff Development Corporation.

Received: 2014/08/19
Accepted: 2015/01/17

The Study of Seismic Destruction of an Adobe Shop in the Bam Citadel and its Restoration Plan

Mehrdad Hejazi* Bina Hejazi Hamed Mehdad*** Saba Hejazi******

Abstract

After the destruction of the Bam citadel by the earthquake in 2003, the restoration of the citadel started based on a ten-year action plan. Due to lack of enough experience and knowledge for restoration and strengthening of historical adobe structures in Iran and in order to elevate the experience and knowledge, the study of the causes of destruction of an adobe shop in the bazaar of the citadel and preparation of its restoration and strengthening plan was performed as a pilot project. The main objective was the restoration of the adobe shop to its situation before the earthquake and strengthening in order to withstand future earthquakes. The research method is descriptive-analytical and the data has been collected by library studies and field research. After studying existent literature about the history and architecture of the citadel and shops of bazaar, and the vernacular techniques and materials used in their construction, a wide fieldwork for documentation and pathology was conducted. The strengthening and restoration plan was suggested based on charters for restoration of historical buildings and then it was simulated by the ANSYS code. Obtained results indicate that if the building is restored without strengthening it will have a weak behaviour against future earthquakes and it will experience the same damages. Analyses show that it is possible to improve structural behaviour and eliminate seismic damages by inserting a number of strengthening wooden elements at the corners of walls and edges of openings and then tying them to the roof level as a reversible method with the minimum intervention. In addition, by underpinning and partial reconstruction, grout injection and reconstruction of missing connections it is possible to restore the building stronger than before so that it would have an acceptable strength against future earthquakes.

Keywords: Bam citadel, adobe shop, seismic behaviour, strengthening, restoration

* Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Isfahan
** MSc, Islamic Azad University of Khorasgan, Isfahan
*** MSc, Islamic Azad University of Najafabad, Isfahan
**** BSc, Art University of Isfahan