

مقاله پژوهشی

ارتقای عملکرد لرزه‌ای ابنیه خشتی تاریخی (نمونه موردی: برج کبوتر استوانه‌ای
امینی در روستای ولاشان ۱ اصفهان)پردیس قصری^{۱*}، علی زمانی‌فرد^۲، وحید ذات‌اکرم^۳

۱- کارشناسی ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، گروه مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر ایران

۲- دانشیار، گروه مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر ایران

۳- دانشجوی دکتری مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، گروه مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر ایران

چکیده

در طول سالیان متمادی، ساختارهای خشتی به‌عنوان الگویی رایج در تاریخ معماری ایران موردتوجه بوده‌اند. تایی جایی که امروزه بخش قابل‌توجهی از این بناها به‌عنوان گونه‌ای حائز اهمیت از میراث معماری ایران شایسته حفاظت تلقی می‌گردند. یکی از چالش‌های جدی این گونه ساختمان‌ها حفاظت از آن‌ها در برابر مخاطرات طبیعی به‌ویژه در رابطه با زمین‌لرزه است. تاکنون بیشتر به ارتقای عملکرد لرزه‌ای بناهای خشتی مسکون انسانی در قیاس با دیگر انواع این گونه بناها پرداخته شده است. هدف این پژوهش بررسی ارتقای عملکرد لرزه‌ای کبوترخانه‌ها به‌عنوان میراث خشتی در حوزه میراث کشاورزی با تمرکز بر کبوترخانه امینی ولاشان است. مرور ادبیات موجود حاکی از فقدان پژوهش کافی در زمینه بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای کبوترخانه‌ها است. پژوهش از حیث هدف از گونه پژوهش‌های کاربردی محسوب می‌شود. داده‌های موردنیاز تحقیق از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی به‌دست‌آمده و راهبرد موردتکای آن از نوع استقرایی است. همچنین تجزیه و تحلیل اطلاعات با تکیه بر مدل‌سازی رایانه‌ای صورت پذیرفته است. پس از مطالعه مستندات موجود درباره تاریخ و معماری برج‌های کبوتر و تکنیک‌ها و مصالح بومی به‌کاررفته در ساخت آسیب‌شناسی انجام شده است. بر مبنای اصول حفاظت و مرمت، طرح مقاوم‌سازی پیشنهاد و با استفاده از مدل‌سازی لرزه‌ای در نرم‌افزار آباکوس، روشی برای استحکام‌بخشی برج کبوتر خشتی با فرم استوانه‌ای پیشنهاد شد. پژوهش حاضر تلاش نموده تا راهکار مداخله‌ای ارائه دهد که مبتنی بر تحلیل داده‌های نرم‌افزاری، شناسایی رفتار لرزه‌ای، نقاط شکست و همچنین مستندات موجود و آسیب‌شناسی باشد. نتایج بیانگر عملکرد ضعیف سازه موجود در زلزله‌های آینده و ایجاد خسارات مشابه در صورت مرمت نمودن بدون مقاوم‌سازی است. نتایج تحلیل لرزه‌ای تحت تأثیر چهار رکورد زلزله در برج کبوتر امینی نشان داد، مدل تقویت‌نشده در برابر زلزله پایدار نمی‌ماند و پس‌از آن با توجه به ضعف‌های موجود در سازه دچار گسیختگی کامل می‌شود؛ در نمونه تقویت‌شده با قرار دادن یک عنصر افقی تقویت‌کننده چوبی و با کمترین مداخله ممکن، میزان تنش و جابه‌جایی در سازه به‌صورت نسبی کاهش یافت، لازم به ذکر است تنها با اعمال یک کلاف افقی چوبی سازه نسبت به مدل بدون تقویت‌نشده در برابر رکوردهای زلزله پایدار ماند و نیاز است تعداد بیشتری عناصر چوبی به‌صورت افقی و قائم به سازه اعمال شود تا در برابر زلزله‌های آتی پایدار بماند.

تاریخ دریافت:

۰۵ آذر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۳ مرداد ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

ابنیه خشتی تاریخی

کبوترخانه‌های استوانه‌ای

استحکام‌بخشی لرزه‌ای

کبوترخانه امینی

doi : 10.22034/AHDC.2025.22404.1842

E-ISSN: 2645-372X /© 2023. Published by Yazd University This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

۱- مقدمه

در استان اصفهان بخشی از بناهای تاریخی خشتی با کاربری غیرمسکونی انسانی وجود دارند که تحت عنوان کبوترخانه شناخته شده و جز گونه‌ای از میراث، یعنی میراث کشاورزی به حساب می‌آیند. برخی از این کبوترخانه‌ها مانند کبوترخانه امینی واقع در روستای ولاشان وضعیت حفاظتی مناسبی ندارند و نیاز است تا در راستای تطویل عمر آن تمهیدات حفاظتی جدی اندیشیده شود. با توجه به ضعف عمده بناهای خشتی در برابر زلزله و همین‌طور وقوع پدیده فرونشست زمین در منطقه اصفهان که می‌تواند اثرات احتمالی زمین‌لرزه را بر این‌گونه بناها تشدید نماید به نظر می‌رسد که بدون توجه به ارتقای عملکرد لرزه‌ای این بنا حفاظت مؤثر از آن میسر نباشد. از این جهت این پژوهش نگاهی مختصر به عملکرد سازه‌ای برج‌های کبوتر داشته و یک برج کبوتر در روستای ولاشان که در اطراف اصفهان قرار دارد را مورد مطالعه قرار داده است. هدف اصلی مقاله یافتن روش استحکام‌بخشی مناسب برای این سازه خشتی جهت حفاظت هر چه بهتر آن در برابر مخاطرات لرزه‌ای است.

پرسش تحقیق

پژوهش پس از کسب شناخت کافی و مرور مبانی نظری مرتبط با آن به سراغ شناخت راهکار مناسب برای استحکام‌بخشی لرزه‌ای سازه خشتی برج کبوتر رفته تا به یک سؤال اصلی پاسخ بدهد: (۱) ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه خشتی برج کبوتر امینی چگونه امکان‌پذیر است؟

۲- پیشینه تحقیق

تاکنون تحقیقات بسیاری پیرامون استحکام‌بخشی لرزه‌ای سازه‌های خشتی انجام شده است؛ اما تاکنون کمتر تحقیقی به‌طور دقیق به بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای برج کبوتر و یافتن روش استحکام‌بخشی مناسب پرداخته است. عمده مطالعات انجام‌شده در حوزه کبوترخانه‌ها به توصیفات کلی پرداخته‌اند. با توجه به مسائل و ضروریات موجود و مطالعات اندک در حوزه پایداری لرزه‌ای کبوترخانه، پژوهش به این موضوع پرداخته است. در ادامه تعدادی از پژوهش‌های انجام‌شده درباره چگونگی استحکام‌بخشی یک ساختار خشتی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در پژوهش بررسی‌شده اشاره شد پیش از پیشرفت تکنولوژی، روش‌های سنتی مانند شمع‌گذاری، دوغاب‌ریزی، پشت‌بند زدن، مهاربندی و تعویض مصالح به همراه تعمیر اتصالات جهت مقاوم‌سازی و استحکام‌بخشی بناهای تاریخی جهت حفظ آنها مرسوم بوده است (Armour & et al, 2000). مطالعه انجام‌شده جهت مرمت و استحکام‌بخشی یک حجره خشتی در بازار اصلی ارگ بم نشان داد که این حجره را می‌توان تنها با افزودن تعدادی المان چوبی در گوشه دیوارها و لبه بازشوها و اتصال افقی آنها در تراز سقف، با حداقل مداخله و برگشت‌پذیر بودن اقدامات، استحکام‌بخشی کرد. 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 (حجازی و همکاران، ۱۳۹۳). مطالعه‌ی بعدی به بررسی یک سازه خشتی در بافت اصفهک^۲ پرداخته‌اند و پس از انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس^۳ و برآورد شرایط لرزه‌ای بنا به این نتیجه دست یافته‌اند که با به‌کارگیری المان‌های چوبی و طناب‌های بافته‌شده از الیاف درخت خرما به‌عنوان راهکار بهینه می‌توان مقاومت لرزه‌ای را در برابر زلزله‌های آتی افزایش داد (ذات اکرم، زمانی‌فرد، ۱۳۹۸). مطالعه‌ی بعدی با تحلیلی بر روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان‌های خشتی بر اساس آیین‌نامه و استانداردهای خشت عنوان کرده است، عموماً مصالحی که سختی آن از مصالح خشتی بیشتر باشد در مقابل نیروهای زلزله مقاومت بیشتری از خود نشان داده و لذا در مقابل جابه‌جایی و نیروهای وارد بر سازه خشتی نه تنها نقش تقویت‌کننده را ایفا نمی‌کنند؛ بلکه باعث تخریب سریع‌تر بنای خشتی می‌شوند. مصالحی مانند چوب و نی همسازی بهتر و رفتار سازگارتری با مصالح خشتی داشته‌اند (امیدواری، ۱۳۹۸). پژوهشگران در مطالعه بعدی برای استحکام‌بخشی سازه مصالح بنایی؛ روش‌های تقویتی مانند استفاده از الیاف پلیمری بر روی سطح دیوار مصالح بنایی،

استفاده از نوار فولادی ضدزنگ، استفاده از ژئوگرید در اتصال بین آجرها، جلوگیری از ترک‌های برشی دیوارهای مصالح بنایی با استفاده از مهاربندهای فولادی، تزریق دوغاب ملات سیمان، کامپوزیت‌های سیمانی، چسب اپوکسی و شاتکریت بتنی را پیشنهاد کرده‌اند (استاد و شفائی، ۱۳۹۹). در پژوهش بعدی اشاره شده، استفاده از روش‌هایی مانند اجرای پشت‌بند و شمع‌های چوبی به دلیل هماهنگی در جنس مصالح از سنخیت بیشتری با سازه‌های بنایی برخوردار بوده و علاوه بر آن دارای برگشت‌پذیری بالا و کمترین میزان آسیب به بنا هستند به‌همین خاطر اولویت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها مانند گونیت، شاتکریت و استفاده از میکروپایل‌ها دارند. (ولی، مهدیزاده سراج، مؤذن، ۱۴۰۱: ۱۹۹). نتایج ارائه شده در تحقیق بعدی عنوان کرده به‌هنگام گزینش سطح مناسب مداخله، باید به اصل برگشت‌پذیری و حداقل مداخله توجه ویژه شود. همچنین در رابطه با گزینش نوع مصالح و فنون، همواره راهکارهای سنتی که تقویت الگوهای بومی را ترجیح داده و فنون و مهارت‌های سنتی را تداوم بخشند در اولویت هستند؛ اما اگر ناکارآمدی این روش‌ها مشخص شود؛ بهتر است مرمتگر به سراغ روش‌ها و مصالح مدرن رود (ذات‌اکرم، زمانی‌فرد، ۱۴۰۲: ۱۱۳). تحقیق بعدی به بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای قلعه فلک‌الافلاک در استان لرستان پرداخته است. جهت بهسازی از ریز شمع‌ها و شمع‌های درجا به‌منظور کنترل رانش خاک و نیز از هسته مرکزی مسلح استفاده شده است. نتایج تحلیل‌های استاتیکی معادل غیرخطی نشان داد، آسیب‌پذیری بنای بهسازی شده به میزان قابل‌ملاحظه‌ای سبب کاهش مقدار و گستردگی کرنش‌های اصلی بیشینه متناظر با ترک‌خوردگی در مصالح بنایی شده است (خالو، یک‌رنگ نیا، ۱۴۰۲). مقاله بعدی اشاره کرده یکی از آسیب‌های رایج در ساختار خشتی، ترک‌خوردگی و یا فروریختن جزئی دیواره در اثر حرکات افقی، خمش و حرکت خارج از صفحه دیوارها است. از جمله راهکارهای ارائه شده جهت استحکام‌بخشی دیواره، استفاده از تیر چوبی و تیرهای بتنی برای مقاوم‌سازی در مقابل بارهای وارده است. پژوهش عنوان کرده این تیرهای حلقوی بر روی دیواره خشتی نصب می‌شود، تیرهای حلقوی چوبی خاصیت انعطاف‌پذیری بیشتری دارند. (Illampas, Ioannou a & C. Charmpis, 2013). همچنین نتایج یافت شده در مقاله بعدی نشان داده با استفاده از تیرهای حلقه‌ای چوبی و یا اتصالات چوبی که دیوارهای موازی را به هم متصل می‌کنند و راهکاری سازگار با خشت و کم‌هزینه هستند باعث افزایش مقاومت لرزه‌ای می‌شوند؛ اما از طرفی می‌توان با استفاده از تکنیک‌های جدید مانند میله‌های فولادی، توری بافته شده با فلز و یا پلاستیک^۴ و سپس پوشش با ملات گلی مقاوم‌سازی انجام داد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با ترکیب روش‌های سنتی و جدید یک مقاوم‌سازی موفق صورت می‌گیرد؛ اما لازم است این فنون جدید به ارزش‌های یک ساختار خشتی توجه کنند (Tim LG, 2015). تحقیق بعدی عنوان کرده است تکنیک‌های مقاوم‌سازی سنتی می‌تواند یکپارچگی سازه‌های خاکی را بهبود بخشد. استفاده از مهار جانبی، سیستم لنگرهای چوبی عمودی و همچنین اجرای یک سیستم قاب چوبی که در سطح بالایی قرار دارد و از تمام ضخامت دیوارهای خاکی عبور می‌کند می‌تواند ظرفیت تحت نیروهای جانبی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد (Paulo B. Lourenço, 2019 & et al). پژوهشگران در پژوهش خود عنوان کرده‌اند با استفاده از میلگردهای تقویت‌کننده در شیارهای ایجاد شده در سطح^۵ دیوارهای خشتی می‌توان به میزان قابل‌توجهی استحکام، ظرفیت جابه‌جایی، شکل‌پذیری، مقاومت جانبی و ظرفیت جابه‌جایی دیوارهای تقویت‌شده را افزایش داد (Banadaki, Morshed, and Eslami, 2019). در مقابل فنون سنتی استحکام‌بخشی، برخی از فنون جدید می‌تواند سبب پایداری لرزه‌ای سازه خشتی گردد، اگرچه برخی از این فنون با زیست‌بوم منطقه منطبق نیستند. تحقیق میدیان و همکاران نشان داده یکی از روش‌های مناسب استحکام‌بخشی در اقلیم گرم و خشک، نصب مش خرما بر روی سطح خارجی دیوار و پوشش آن‌ها با ملات کاه‌گل است. مش‌های بافته شده از الیاف خرما یک مصالح سنتی و سازگار با زیست‌بوم است. می‌توان با استفاده از مش بافته شده الیاف خرما که در دسترس مردم محلی نیز قرار دارد، یکپارچگی نمونه‌های دیوار خشتی را بهبود بخشید. همچنین با توزیع مناسب ترک‌ها در دیوار سبب به تعویق انداختن افت ناگهانی مقاومت، در نمونه‌های تقویت‌شده دیوار خشتی گردید (Meybodian, Eslami, Morshed, 2020). همچنین پژوهش بعدی به ارزیابی لرزه‌ای یک بنای خشتی در شهر لیما به‌عنوان یک منطقه با شدت لرزه‌خیزی بالا و شناسایی مکانیسم رفتار سازه‌ای و ویژگی‌های مصالح، ارزیابی لرزه‌ای و طراحی سازه‌ای منطبق بر استاندارد لرزه‌ای کشور پرو صورت گرفته است. نتایج نشان داده، استفاده از اتصالات و تیر چوبی برای بخشی از بنا، استفاده

از مش‌های پلیمری و ژئوگرید برای دیواره‌ها، بازسازی مجدد در مواردی که دیواره دچار فروریزش کامل شده، می‌تواند بر پایداری بنا مؤثر باشد (Martins & et al, 2020). در پایان این بخش باید عنوان کرد مطالعات زیادی در رابطه با ساختمان‌های خشتی و استحکام‌بخشی آن‌ها در سال‌های اخیر توسط محققان انجام شده است؛ اما موضوع استحکام‌بخشی لرزه‌ای برج‌های کبوتر به‌عنوان یک سازه خشتی و با فرم استوانه یک حوزه تحقیقاتی بدیع و نوآورانه به شمار می‌رود که در پژوهش‌های پیشین به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. در جدول ۱-۱ یک جمع‌بندی از پیشینه‌های مطالعه شده ارائه شده است.

جدول ۱: جمع‌بندی پژوهش‌های مطالعه شده با تمرکز بر نکات مربوط به پایداری لرزه‌ای در هر پیشینه (مأخذ: نگارندگان)

پژوهشگر	سال پژوهش	اشاره به موضوع استحکام‌بخشی در پژوهش	
پژوهش داخلی	سید امیرمهرداد حجازی و همکاران	۱۳۹۳	افزودن تعدادی المان چوبی در گوشه دیوارها و لبه بازوها و اتصال افقی آنها در تراز سقف
	وحید ذات‌اکرم، علی زمانی‌فرد	۱۳۹۸	به‌کارگیری المان‌های چوبی و طناب‌های بافته‌شده از الیاف درخت خرما
	سمیه امیدواری	۱۳۹۸	استفاده از چوب و نی برای استحکام‌بخشی خشت
	دلارام استاد، جلیل شفایی	۱۳۹۹	استفاده از الیاف پلیمری، نوار فولادی ضدزنگ، استفاده از ژئوگرید، استفاده از مهارندهای فولادی، تزریق دوغاب ملات سیمان، کامپوزیت‌های سیمانی، چسب اپوکسی و شاتکریت بتنی
	هلیا ولی، فاطمه مهدیزاده سراج، سجاد مؤذن	۱۴۰۱	اجرای پشت‌بند و شمع‌های چوبی و همچنین به‌کارگیری شیوه‌های نوین
	وحید ذات‌اکرم، علی زمانی‌فرد	۱۴۰۲	استفاده از راهکارهای سنتی و تقویت الگوهای بومی
	علیرضا خالو، محمد یک‌رنگ نیا	۱۴۰۲	بهبود سیستم بهسازی با استفاده از ریز شمع‌ها و شمع‌های درجا
	Armour & et al	۲۰۰۰	استفاده از روش سنتی مانند شمع‌گذاری، دوغاب‌ریزی، پشت‌بند زدن، مهاربندی و تعویض مصالح
پژوهش خارجی	Rogiros Illampas a, Ioannis Ioannou a & Dimos C. Charmpis	۲۰۱۳	استفاده از تیر چوبی و تیرهای بتنی
	Michiels, Tim LG	۲۰۱۵	استفاده از تیرهای حلقه‌ای چوبی، استفاده از تکنیک‌های جدید مانند میله‌های فولادی، توری بافته‌شده با فلز و یا پلاستیک
	Paulo B. Lourenço & et al	۲۰۱۹	استفاده از میلگردهای تقویت‌کننده در شیارهای ایجادشده در سطح دیوارهای خشتی
	Banadaki, Morshed, and Eslami	۲۰۱۹	استفاده از مهار جانبی، سیستم لنگرهای چوبی عمودی و همچنین اجرای یک سیستم قاب چوبی
	Meybodian, Eslami, and Morshed	۲۰۲۰	نصب مش خرما بر روی سطح خارجی دیوار و پوشش آن‌ها با ملات کاه‌گل
	Martins & et al	۲۰۲۰	استفاده از اتصالات و تیر چوبی برای بخشی از بنا، استفاده از مش‌های پلیمری و ژئوگرید

۳- بخش مواد و روش‌ها

پژوهش از حیث هدف از گونه پژوهش‌های کاربردی محسوب می‌شود. داده‌های مورد نیاز تحقیق از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی به‌دست آمده و راهبرد مورد اتکای آن از نوع استقرایی است. همچنین تجزیه و تحلیل اطلاعات با تکیه بر مدل‌سازی رایانه‌ای صورت پذیرفته است. علاوه بر این با مطالعه تجارب و پژوهش‌های پیشین در خصوص مرمت‌های

انجام شده و بهره‌گیری از سفرنامه‌ها به جمع‌آوری اطلاعات پرداخته شده است. در روش میدانی با مشاهده سایر برج‌های کبوتر، عکس‌برداری از وضعیت فعلی و همچنین بررسی فرم در گذشته، استفاده از کروکی و برداشت از آسیب‌های وارده، شناخت بیشتری حاصل شده است. شیوه تجزیه و تحلیل اطلاعات مبتنی بر آنالیز سازه‌ای و در شمار تحقیق‌های کمی است. در بخش تجزیه و تحلیل اطلاعات مبتنی بر مدل‌سازی رایانه‌ای، از نرم‌افزار مدل‌سازی لرزه‌ای آباکوس^۶ استفاده شده و سپس بر مبنای دستورالعمل‌ها و منشورهای مرتبط با مرمت بناهای تاریخی و تکیه بر استفاده از تکنیک‌های بومی مرمت و مصالح بوم‌آورد، طرح مقاوم‌سازی پیشنهاد شده است. نحوه مدل‌سازی بنای مورد مطالعه به صورت ماکرو است. با توجه به اصل شبیه‌سازی، برای تطابق بین مدل‌های آزمایشگاهی با مدل‌های عددی ساختمان‌های بنایی دو رویکرد ماکرو المان و میکرو المان برای مدلینگ ساختمان‌های بنایی فراسوی ماکرو قرار دارد. در رویکرد ماکرو المان خشت و ملات به صورت پیوسته مدل می‌شود و مشخصات مصالح مربوط که شامل ملات و خشت است داده می‌شود، در مدل میکرو المان، خشت و ملات هر کدام به صورت جداگانه مدل می‌شود و مشخصات مربوط به هر کدام به صورت جداگانه تخصیص داده می‌شود. تحت دو شرایط مدل‌سازی لرزه‌ای در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. طرح یک: مدل‌سازی برج کبوتر بدون تمهیدات لرزه‌ای انجام شده تا پایداری سازه در برابر زلزله ارزیابی شود. طرح دو: کلاف چوبی افقی در دو سوم از ارتفاع به سازه برج اضافه شده تا تغییرات در پایداری لرزه‌ای به دست آید. بر مبنای تحلیل نتایج حاصل از مطالعات کارگاهی و مدل‌سازی و بر اساس اصل حداقل مداخله به منظور تأمین مقاومت مورد نظر به گونه‌ای که مداخله برگشت‌پذیر باشد، نسبت به انتخاب روش مرمت و مقاوم‌سازی تصمیم‌گیری شد. برای انجام تحلیل‌های دقیق لرزه‌ای مشخصات خشت و سازه بنایی استخراج و در جداول ارائه شده است. به دلیل محدودیت‌های مالی و زمانی، همچنین انجام پژوهش در مقیاس مطالعاتی و نه اجرایی، تاریخی بودن نمونه مطالعاتی و عدم امکان نمونه‌برداری از سازه، از مشخصات مکانیکی موجود در سایر پژوهش‌ها استفاده شده است. در جداول ۲ تا ۴ مشخصات مکانیکی مصالح استفاده شده در مدل‌سازی ارائه گردیده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی چوب (حجازی و دیگران، ۱۳۹۳: ۷۶)

وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	تنش تسلیم فشاری (مگا پاسکال)	تنش تسلیم کششی (مگا پاسکال)
۶۰۰	۰/۴۷	۸۰۰	۳	۶

جدول ۳: مشخصات مکانیکی خشت (حجازی و دیگران، ۱۳۹۳: ۷۶)

جرم حجمی (کیلوگرم بر مترمکعب)	چسبندگی	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	ضریب پواسون (مگا پاسکال)	مقاومت کششی (مگا پاسکال)
۱۸۰۰	۵/۸	۱۰۷	۰/۲	۳۰۰۰

جدول ۴: مشخصات مکانیکی خشت ساده (حجازی و دیگران، ۱۳۹۳: ۷۵)

خشت ساده	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	مقاومت خمشی (مگا پاسکال)
	۱/۸	۰/۱۳۰۶

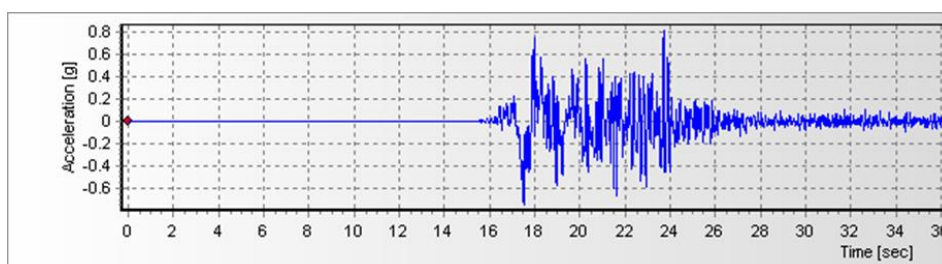
۳-۱- پارامترهای انتخاب شتاب‌نگاشت

با توجه به مینا قرار دادن استاندارد ۲۸۰۰، باید شتاب‌نگاشت تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا در هنگام زلزله باشد. بدین منظور باید حداقل بین ۳ تا ۷ شتاب‌نگاشت با ویژگی‌های عنوان شده در استاندارد ۲۸۰۰ در آنالیز مورد استفاده قرار گیرد. برج کبوتر مورد مطالعه در محدوده‌ی اصفهان قرار گرفته است. بیشینه‌ی شتاب زمین با احتمال رویداد ۱۰٪ در ۵۰ سال در شهر اصفهان از ۰/۱۸g تا ۰/۳۵g متغیر است که این مقدار در استاندارد ۲۸۰۰ ایران برابر ۰/۲۵g تعیین شده است. همچنین زمین منطقه مورد مطالعه طبق استاندارد ۲۸۰۰ از نوع ۲ و ۳ است که در جهت اطمینان

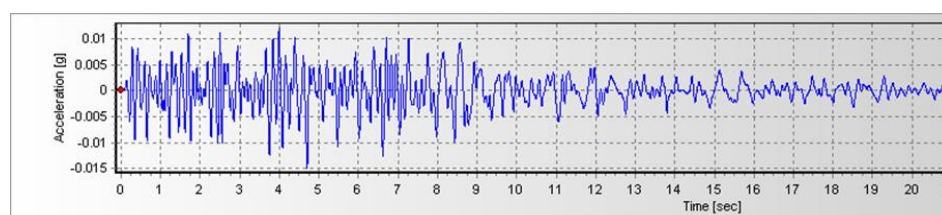
۳ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه در دسترس نیست، زلزله‌های واقعی اتفاق افتاده در مناطق دیگر که با شرایط تکتونیکی و لرزه‌خیزی اصفهان تطابق دارند، مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس شده‌اند. بدین منظور از اطلاعات لرزه‌ای جمع‌آوری شده توسط دانشگاه برکلی^۷ استفاده شده است. اطلاعات مذکور مربوط به ۳ زلزله با بزرگای ۵٫۷-۶٫۷ ریشتر و تا شعاع ۱۰۰ km و سرعت برشی خاک بین ۱۸۰-۳۶۰ m/s است. علاوه بر سه زلزله مذکور اطلاعات شتاب‌نگاشت زلزله بم نیز برداشت شده است. علاوه بر سه زلزله مذکور در نظر است تغییرات سازه تحت زلزله بم به‌عنوان یکی از مرگبارترین زلزله‌های رخ داده در ایران بررسی شود. لازم به ذکر است جهت ارزیابی رفتار سازه در برابر زلزله از نرم‌افزار سیسموسیگنال^۸ استفاده شده تا رکوردهای زلزله تحلیل شود. برای محاسبه ضریب مقیاس، شتاب مبنای طرح بر بیشینه شتاب در هر رکورد زلزله تقسیم شده است. باید اشاره شود علی‌رغم محدودیت‌های موجود در داده‌های شتاب‌نگاشت، ضرایب مقیاس پیشنهادی در این مقاله بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و رکوردهای بین‌المللی محاسبه شده‌اند. در جدول شماره ۵ مشخصات زلزله‌ها ثبت گردیده است. در تصاویر ۱ تا ۸، نمودارهای مربوط به شتاب‌نگاشت زلزله قرار گرفته است.

جدول ۵: مشخصات زلزله‌های استفاده شده در پژوهش

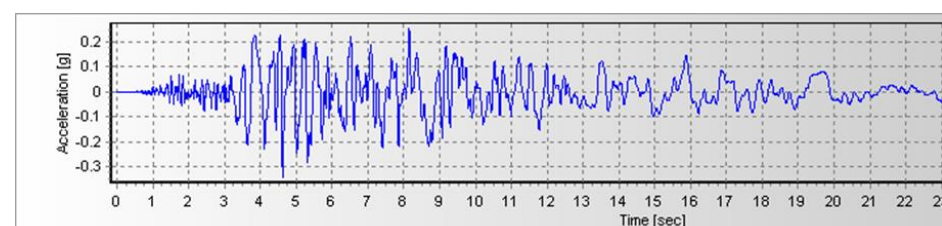
شماره	نام زلزله	سال	بزرگای (M)	شتاب مبنا طرح (g)	بیشینه شتاب زمین (g)	ضریب مقیاس
۱	دریاچه کیوته	۱۹۷۹	۵/۷	۰/۲۵	۰/۲۴۸	۰/۸۳
۲	نورث ریج	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۲۵	۰/۶	۰/۳۸۵
۳	ایمپریال ولی	۱۹۷۹	۶/۵	۰/۲۵	۰/۴	۰/۶
۴	بم	۲۰۰۳	۶/۶	۰/۲۵	۰/۸	۰/۳۶



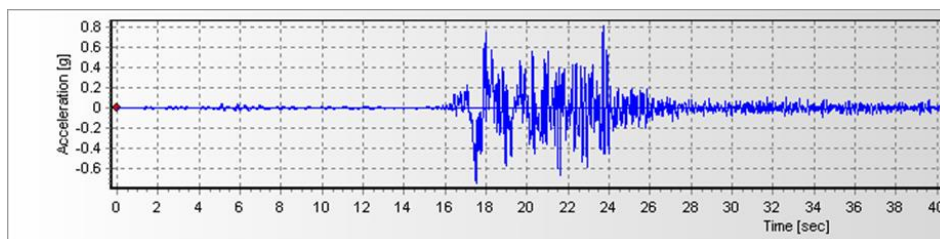
تصویر ۱: نمودار مؤلفه‌ی طولی شتاب‌نگاشت زلزله بم (مأخذ: برداشت شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)



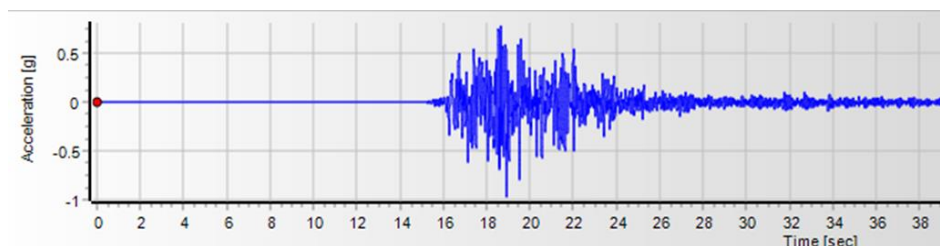
تصویر ۲: نمودار مؤلفه‌ی طولی شتاب‌نگاشت زلزله ایمپریال ولی (مأخذ: برداشت شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)



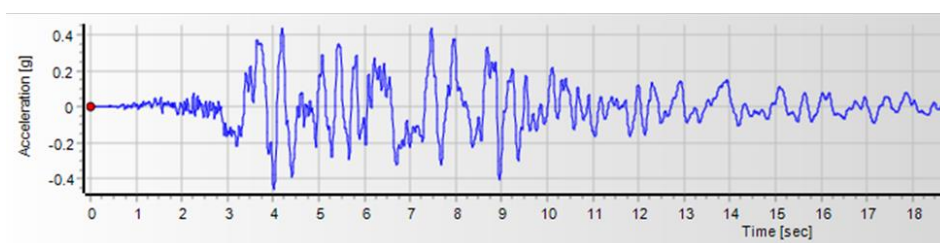
تصویر ۳: نمودار مؤلفه‌ی طولی شتاب‌نگاشت زلزله نورث ریج (مأخذ: برداشت شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)



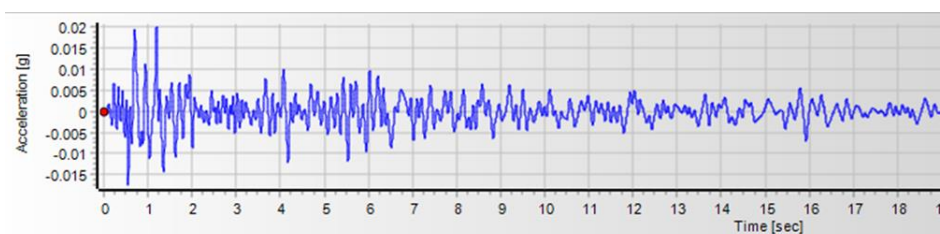
تصویر ۴: نمودار مؤلفه‌ی طولی شتاب‌نگاشت زلزله دریچه کیوته (مأخذ: برداشت‌شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)



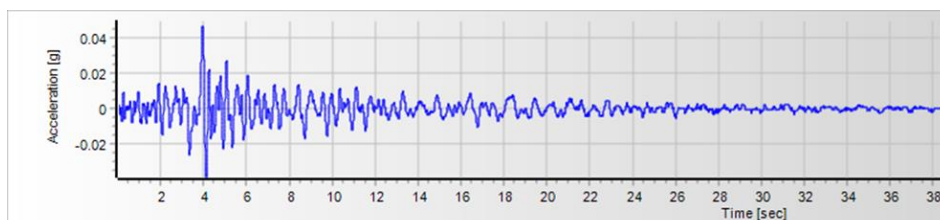
تصویر ۵: نمودار مؤلفه‌ی عرضی شتاب‌نگاشت زلزله بم (مأخذ: برداشت‌شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)



تصویر ۶: نمودار مؤلفه‌ی عرضی شتاب‌نگاشت زلزله ایمپریال ولی (مأخذ: برداشت‌شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)



تصویر ۷: نمودار مؤلفه‌ی عرضی شتاب‌نگاشت زلزله نورث‌ریج (مأخذ: برداشت‌شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)



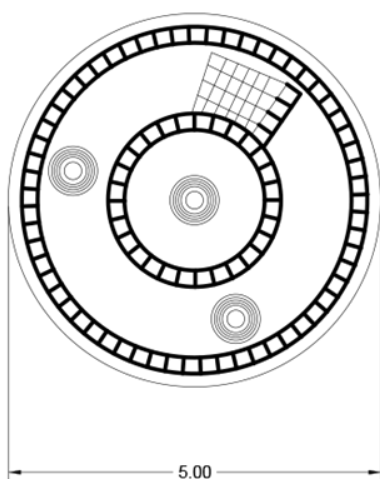
تصویر ۸: نمودار مؤلفه‌ی عرضی شتاب‌نگاشت زلزله دریچه کیوته (مأخذ: برداشت‌شده توسط نگارندگان در نرم‌افزار سیسموسیگنال)

۴- معرفی بنای مورد مطالعه

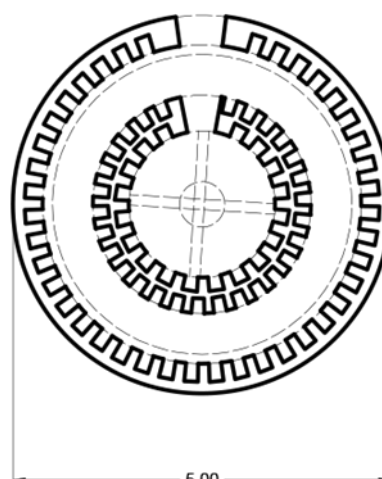
کبوترخانه مورد مطالعه در این پژوهش کبوترخانه امینی در روستای ولایشان از توابع شهرستان خمینی شهر اصفهان بوده است. این روستا در شهر درچه از دهستان ماربین وسطی و بخش مرکزی از توابع شهرستان خمینی شهر در جنوب غرب شهر اصفهان واقع است.

سازه‌ی برج کبوتر دارای دو استوانه‌ی درون هم است که فرم کلی این بنا به سمت یک مخروط ناقص میل می‌کند. استوانه‌ی بیرونی قسمت‌هایی برای لانه‌های کبوتر دارد که قطر خارجی آن ۵ متر، ارتفاع آن ۶/۲ متر بوده و ضخامت جری معادل ۰/۴۵ متر دارد. استوانه داخلی در فاصله ۰/۶ متری از استوانه بیرونی قرار دارد که در دو طرف دارای لانه‌بندی است. قطر خارجی معادل ۳/۲ متر است، ارتفاع آن از استوانه قبلی بیشتر و در حدود ۸/۲ متر است که امتداد آن از بیرون حجمی متمایز دارد، جرز این استوانه دارای ضخامت ۰/۶۵ متر است. برج کبوتر امینی با گذر زمان دچار تخریب شده و شرایط فیزیکی و هندسی آن تغییر کرده است. این کبوترخانه دارای دست‌انداز آجری بام و فلفلدان است که درواقع یک حجم استوانه‌ای شکل متخلخل مخصوص آمدوشد کبوتران به حساب می‌آید. تعداد اصلی این فلفلدان‌ها سه عدد بوده که متأسفانه تخریب شده و در حال حاضر تنها یک فلفلدان باقی مانده است. کلاف چوبی در ارتفاع دو سوم از سطح زمین در داخل برج قرار گرفته که به علت فرسودگی از محل خود جدا شده و کارکرد سازه‌ای خود را از دست داده است. کلاف‌های چوبی با زاویه‌ی نزدیک به ۹۰ درجه بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و با ملات بر روی خشت گیردار شده‌اند. کلاف‌ها از بدنه برج بیرون زده و به داخل برج گیردار شده‌اند. قرارگیری کلاف‌ها در داخل برج به حفظ زیبایی ظاهری و یکپارچگی نمای بیرونی کمک می‌کند. علاوه بر این با قرارگیری کلاف‌ها در داخل، احتمال آسیب دیدن آن‌ها از شرایط جوی یا دیگر عوامل محیطی کاهش می‌یابد. از منظر سازه‌ای این کلاف‌های چوبی به عنوان تقویت کننده عمل می‌کنند و دو پوسته را به یکدیگر متصل می‌سازند که این امر موجب افزایش استحکام و پایداری برج می‌شود.

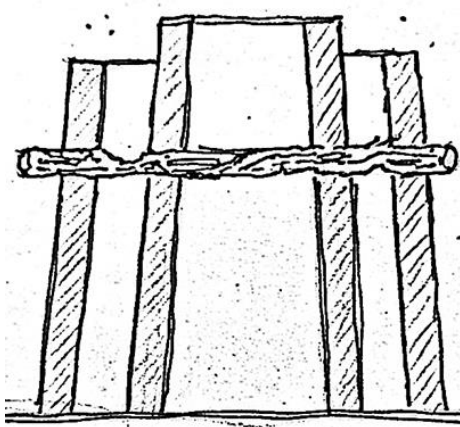
باید متذکر گردید خشت کاملاً نیروی فشاری را تحمل می‌کند؛ اما زمانی که بر اثر نشست‌های پی نیروی برشی و ترک تولید می‌گردد قبل از ایجاد ترک اگر کلاف چوبی در دیوار وجود داشته باشد نیروی برشی به نیروی فشاری تبدیل می‌شود که در نتیجه قابل تقسیم به قسمت‌های دیگر دیوار است. خنثی کردن نیروهای کششی که برای خشت‌ها قابل تحمل نیست. این نقش به چوب واگذار شده است. اتصالات چوبی با ایجاد پشتیبانی اضافی در برابر نیروهای خمشی و کششی نقش مهمی در افزایش مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌ها دارد. برای اطمینان از یکپارچگی سازه، ضروری است که تیرهای چوبی با استفاده از اتصال دهنده‌های مناسب به سازه متصل شوند.



تصویر ۱۰: پلان بام (مأخذ: باز ترسیم شده توسط نگارندگان)



تصویر ۹: پلان کبوترخانه (مأخذ: باز ترسیم شده توسط نگارندگان)



تصویر ۱۲: کروکی دست آزاد از نحوه‌ی قرارگیری چوب بین دو پوسته (مأخذ: نگارندگان)

تصویر ۱۱: جدا شدن کلاف چوبی از محل اتصال خود به پوسته‌ی خارجی برج (مأخذ: نگارندگان)

۵- تکنیک ساخت و پایداری لرزه‌ای^۹ برج‌های کبوتر

به‌کارگیری سطح بیشینه در حجم محاط، اصول مربوط به حرکت، پرواز و قوانین مربوط به تشدید در ساخت برج کبوتر مشاهده شده و با به‌کار بردن حداقل مصالح ساختمانی با ایجاد حداکثر لانه‌های کبوتر و فضاهای ارتباطی، عمارتی بلند و میان‌تهی اما محکم و فشرده پدید آورده است. در کبوترخانه‌های استوانه‌ای عموماً بر بالای آن برجکی قرار دارد و ارتفاع استوانه داخلی بیش از استوانه خارجی است، از طریق پلکان تعبیه‌شده به سطح بام می‌توان دسترسی پیدا کرد. برجک‌ها از آجر و ملات و گل بوده و بر لبه استوانه‌ها نرده‌ی آجری مشبکی با ملات گچ ساخته شده است. استوانه خارجی با استوانه داخلی به‌وسیله جرز و دهنه که بین جرزها به کمک قوس‌های کلیل و ضربی به هم مربوط شده، تقسیم شده است. فرم کبوترخانه‌ها به‌عنوان نمونه‌ای از سازه‌های بلند مرتبه به سمت مخروط ناقص میل می‌کند، انتخاب صحیح این فرم هندسی در کنار سایر تمهیدات به‌کاررفته، سبب مقاومت و بازده سازه‌ای زیادتر شده است. در این نوع فرم هندسی، پلان با مقطع دایره در ساده‌ترین شکل تشکیل شده که یک استوانه توپر در مرکز قرار گرفته و یک حلقه دیگر در اطراف استوانه داخلی است. پیدایش این حلقه‌ها یا لایه‌های متعدد درون هم به استفاده از سطح‌های بیشتر داخلی و خارجی در یک حجم ثابت منجر شده است (محمودیان، چیت‌ساز، ۱۳۷۹).

۶- ساخت‌مایه‌ها در برج کبوتر امینی

عمده مصالح مصرفی در این برج کبوتر، خشت و گل است. این مصالح در چیدن دیوار برج و زدن سقف آن و گل به همراه کاه در اندود داخل و خارج بنا به‌کار رفته است. آجر نیز در بخش‌هایی از این کبوترخانه به کار گرفته شده است. برای مثال در پوشش خارجی بام و فرش آن برای حفظ بام از تأثیر عوامل جوی و آسیب وارده به بنا، از آجر استفاده کرده‌اند. یکی دیگر از مصالح مصرفی به کار رفته در برج کبوتر چوب است که کاربرد سازه‌ای داشته است. تیرچه‌های چوبی در نعل‌درگاه‌ها و همچنین در تیرچه‌های برج به کار رفته است. تیرهای چوبی به‌صورت مهار جوانب مقابل بنا را به هم مرتبط کرده و از لحاظ ساختاری باعث حفظ انسجام بنا در حالت کلی و حتی مانع از فروریختن بنا در مواقع پرواز هم‌زمان کبوترها و ایجاد حالت تشدید می‌شود، این تیرها عملکرد نشست کبوترها در داخل و خارج بنا و روی آنها را نیز دارد. الوارهای چوبی استفاده‌شده، توانایی مقاومت در برابر نیروهای جانبی را دارا هستند. ناودان‌های چوبی و فلزی به‌کار رفته برای خروج آب باران به خارج از بام برج کارگذاری شده‌اند. بین دو استوانه حجم برج پل زده شده است و پوشش سقف استوانه مرکزی گنبدی و بین دو استوانه با طاق ضربی پوشیده شده است. بازشوهایی در سطح تراز زمین برای تخلیه کود تعبیه شده است. در تیرچه دیگری نیز وجود دارد که مالک برای واردشدن و بازدیدهای معمول از آن استفاده می‌کرده است.

۷- آسیب شناسی برج کبوتر

پیش از پرداختن به طرح‌های استحکام بخشی یک جمع بندی از مشکلات موجود در بنای خشتی برج کبوتر انجام شده است. عناصر سازه‌ای یا اتصالات چوبی به کاررفته در بنا به اندازه کافی قوی نیستند که بتوانند در برابر نیروهای جانبی مقاومت کند و دیوارهای خشتی را نگه دارد. به همین دلیل ترک‌های عمودی بزرگ ایجاد شده که ممکن است منجر به ریزش کامل پوسته در زلزله شدید شود. عدم تعادل در محورها عمودی _ افقی و عدم مقاومت خارج از صفحه پوسته‌ها یکی دیگر از مشکلات موجود در سازه است. در برج کبوتر از گل با وجود مقاومت کششی کم به عنوان ملات استفاده شده است. به کارگیری ملات فرسوده سبب شده تا خشت‌های برج به راحتی از ملات جدا و ترک‌های عمیق و سطحی ایجاد شوند. نداشتن مقاومت کششی و فشاری در برج کبوتر سبب کاهش شکل پذیری و سختی آن شده و بخشی از پوسته خارجی به طور کامل به سمت داخل انحراف پیدا کرده است. همچنین جذب آب بالای خشت، به مرور زمان موجب آبستگی و انبساط و انقباض سبب ترک خوردگی و فروپاشی برج کبوتر شده است. با توجه به آسیب پذیری شدید بنای خشتی برج کبوتر باید به بررسی روشی کارآمد و کم هزینه برای برآورد ایمنی سازه ضمن توجه به ملاحظات هندسی پرداخت. در ادامه جدول آسیب شناسی با تمرکز بر آسیب‌های سازه‌ای ارائه شده است.

جدول ۶: جمع بندی مهم ترین آسیب‌های موجود در سازه (مأخذ: نگارندگان)

نوع آسیب	شرح آسیب	عوامل مخرب
ترک	ایجاد شکاف‌های عمودی و یا افقی در پوسته خارجی و داخلی	ناپایداری سازه نشست غیریکتواخت فرسودگی ملات
کمانش	انحراف پوسته خارجی به سمت داخل	بارهای جانبی ضعف در اتصالات چوبی
حرکت خارج از صفحه	ناپایداری پوسته‌ها در برابر بارهای جانبی	برهم خوردن طراحی اولیه ضعف در اتصالات چوبی بارگذاری بیش از حد



تصویر ۱۴: کمانش پوسته خارجی به سمت داخل (مأخذ: نگارندگان)

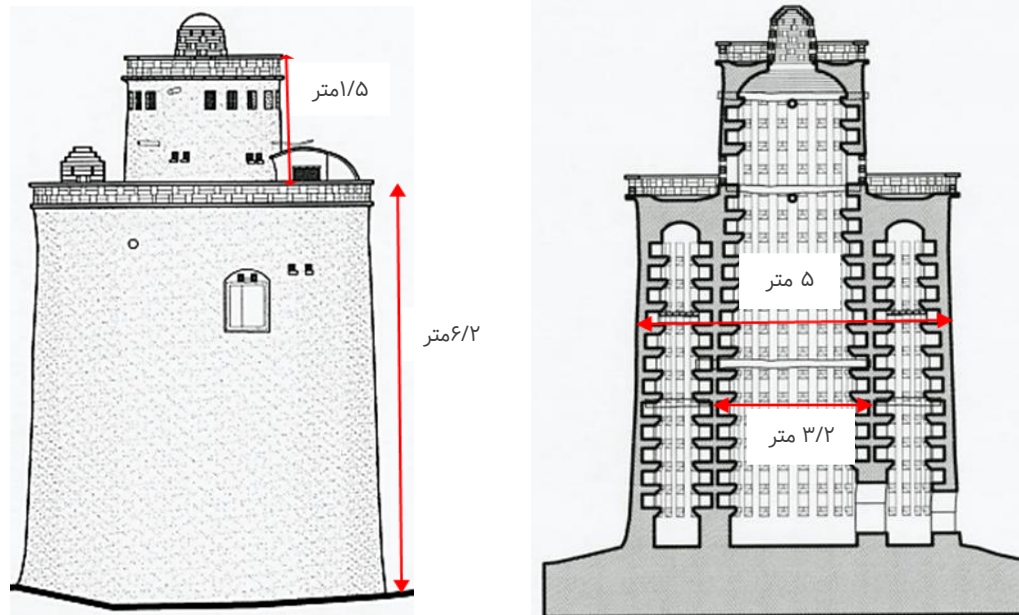


تصویر ۱۳: وجود ترک عمیق در پوسته (مأخذ: نگارندگان)

۱۰-۱- راهبردهای انتخابی برای مداخله‌ی سازه‌ای

با توجه به فهم به دست آمده از ساختار برج کبوتر خشتی و آسیب‌های موجود در آن، پژوهش در نظر دارد تا ساختار موجود را استحکام بخشی کند. دانش سازه‌ای و اصول حفاظتی چندین روش برای تقویت ساختار ارائه می‌دهند که در این بین راهکاری که با وضعیت ساختار و اقلیم منطقه همگون و همچنین همخوانی با اصالت بنا داشته باشد و کمترین میزان مداخله در بنا صورت پذیرد، مدنظر است. کلاف بندی چوبی برای تقویت ساختار خشتی کبوترخانه ایمنی راهکار پیشنهادی

پژوهش است که با اصول ذکرشده ازجمله حفظ اصالت سازه خشتی، سازگاری با اقلیم گرم و خشک و مداخله حداقلی احترام گذاشته است.

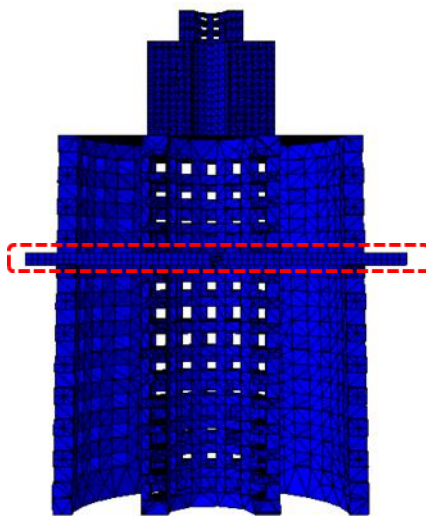


تصویر ۱۵: مداخله در پی و بستر بنا، تعویض کلاف‌های چوبی و تحت نظر قرار دادن ترک‌ها جهت استحکام بخشی (مأخذ: نگارندگان)

۱۱- مدل‌سازی لرزه‌ای سازه تقویت‌شده و سازه تقویت‌نشده در نرم‌افزار آباکوس

همان‌طور که در بخش پیش اشاره شد یکی از راهکارهای پیشنهادی جهت استحکام‌بخشی، استفاده از کلاف‌بندی چوبی است. در صورت استفاده از چوب به شاخص‌هایی ازجمله کمترین میزان مداخله و برگشت‌پذیری اقدامات مرمتی، احترام به اصالت و ارزش‌های اثر و استفاده از ظرفیت روستا احترام گذاشته شده است. این روش پیشنهادی با شاخصه استفاده از فنون جهت افزایش استحکام‌بخشی لرزه‌ای سنخیت دارد. از طرفی دارای صرفه اقتصادی بوده و با صرف کمترین هزینه و حمل‌ونقل امکان‌پذیر است. به همین جهت مدل‌سازی لرزه‌ای در نرم‌افزار آباکوس تحت دو شرایط الف) بدون کلاف چوبی ب) با کلاف چوبی انجام شد. در این تحقیق اتصال کلاف چوبی به دیواره خشتی از طریق روش "تای" ۱۰ در نرم‌افزار آباکوس تعریف شده است. این قید در آباکوس به‌منظور ایجاد اتصال کامل بین دو سطح چوب و خشت به کار رفته است و فرض می‌کند که هیچ لغزش و یا جدایش بین دو سطح رخ نداده است. کلاف چوبی به‌صورت یک جز مستقل تعریف شده و پوسته خشتی نیز به‌عنوان یک ماده جداگانه مدل‌سازی شده است. قید "تای" باعث شده است که درجات آزادی نقاط متناظر در سطح تماس کلاف و خشت به هم گره بخورند، به‌طوری‌که حرکت یکی، بر دیگری تأثیر بگذارد. کلاف چوبی به‌صورت افقی تعریف شده و مشابه نمونه واقعی در ارتفاع دو سوم از سطح زمین به سازه اضافه گردیده است. در تصویر کلاف اضافه‌شده با رنگ قرمز مشخص شده است. برای بررسی رفتار سازه‌ای برج در مدل‌سازی و آنالیز آن شرایطی در نظر گرفته شده است. رفتار مصالح، ایزوتروپیک (خطی) و همگن فرض شده است. تکیه‌گاه‌های موجود در پی به‌صورت پایه‌های گیردار در نظر گرفته شده و درجات آزادی مفاصل مقید شده است. از کنش‌های خاک بر سازه و بالعکس صرف‌نظر گردیده است. مدل‌سازی به‌صورت ماکرو المان در نظر گرفته شده است و تأثیر رکوردهای هر چهار زلزله بر روی سازه تا ثانیه ۴ موردبررسی قرار گرفته است. جهت بررسی رفتار دینامیکی و وضعیت تنش‌ها از آنالیزهای دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. در آنالیز دینامیکی از چهار شتاب‌نگاشت زلزله ایمپریال ولی، نورث‌ریج، دریاچه کیوته و بم استفاده شده است.

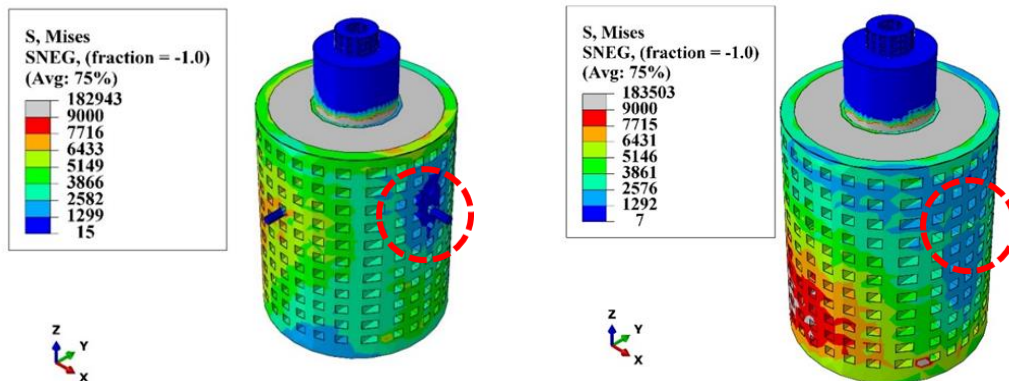
باید متذکر گردید تغییرات جابه‌جایی ۱۱ در آباکوس به معنای جابه‌جایی نقاط مختلف یک مدل تحت بارگذاری و یا شرایط مرزی است. تحلیل‌های استاتیک و شبه‌استاتیک این امکان را فراهم می‌کنند که تغییرات جابه‌جایی را بدون وقوع فروریزش بررسی کنیم. در ادامه تحلیل‌های مربوط به جابه‌جایی و تنش بررسی شده است.



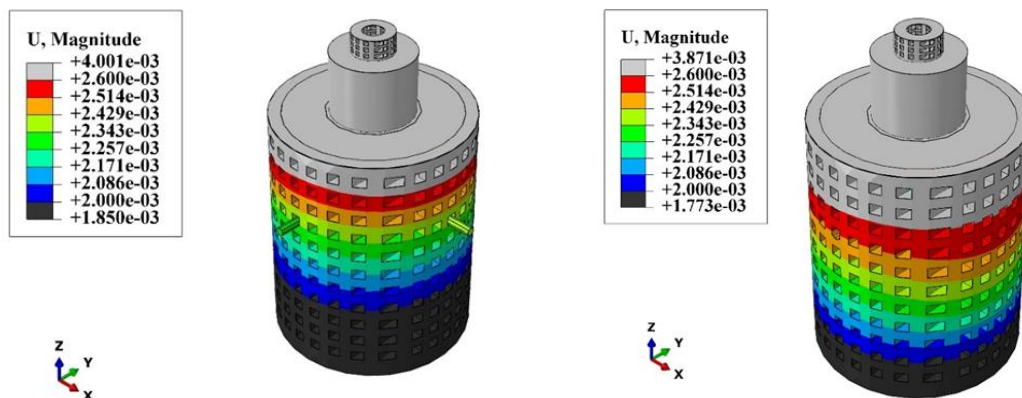
تصویر ۱۶: مدل‌سازی با استفاده از کلاف‌بندی چوبی

تحلیل تغییرات تنش و جابه‌جایی در زلزله بم: بررسی تغییرات جابه‌جایی و شتاب زلزله بم در نرم‌افزار تحلیل لرزه سیزمو سیگنال نشان داده بیشینه شتاب در ثانیه ۲۷ زلزله رخ داده است. بیشینه جابه‌جایی ۳۳ سانتی‌متر بوده که در زمان ۱۷ ثانیه رخ داده است. بررسی‌ها نشان داد تغییرات تنش در زلزله بم بیشتر از سه زلزله دیگر بود. تحلیل سازه تحت بار وزن نشان داد میانگین تغییرات تنش در بازه ۱/۵ تا ۲/۳ پاسکال قرار دارد و بخش بیشتر سازه دچار تنش زیاد نشده است. از ثانیه ۱ به بعد تأثیر هم‌زمان زلزله و وزن بررسی شد. تغییرات تنش در بازه ۱/۸ الی ۲/۶ پاسکال ملاحظه شد و بیشتر تغییرات تنش در بازه زمانی ۰ تا ۲ ثانیه رخ داده است. در ۲ ثانیه پایانی میانگین تنش‌ها ۲/۵ پاسکال بود. علاوه بر این در مدل بدون کلاف‌بندی میانگین تنش‌ها در حدود ۵۰۰۰ پاسکال بود که این میزان در مدل دارای کلاف‌بندی به حدود ۲۰۰۰ پاسکال کاهش یافت. مدل دارای کلاف در ثانیه ۳/۷ تنش بیشینه را تجربه کرد و به میزان $2/83 \times 10^5$ رسید. در همین زمان در مدل بدون کلاف‌بندی تنش $2/48 \times 10^5$ پاسکال بود. تنش بیشینه در نقطه‌ای نزدیک به استوانه بالایی برج در سطح خارجی آن رخ داده است. در مدل دارای چوب در ثانیه ۴ تنش $1/829 \times 10^5$ پاسکال و در مدل بدون چوب تنش $1/835 \times 10^5$ است. علاوه بر کاهش میزان تنش، کانتورهای تنش در اطراف ناحیه اعمال کلاف چوبی نسبت به مدل بدون کلاف دارای شرایط بهینه‌تری هستند و این مورد نشان‌دهنده تأثیر مثبت اعمال کلاف بر کاهش شدن تغییرات تنش در سازه است. تنش‌ها در اطراف چوب به‌طور کلی بیش از ۱۰۰٪ کاهش یافت. تغییرات تنش در نواحی اطراف چوب بر روی سازه با دایره نشان داده شده است. جابه‌جایی بیشینه در بازه زمانی ۱/۵ تا ۳ ثانیه رخ داده است. در رابطه با تغییرات مربوط به جابه‌جایی می‌توان گفت ابتدا در ثانیه ۲/۲۱۶ سازه در حدود ۹ میلی‌متر جابه‌جایی داشته و در ثانیه ۲/۵۱۱، سازه با کلاف چوبی به میزان ۱۰- $1/451 \times 2$ متر جابه‌جایی داشته است. در ثانیه ۴ مقایسه دو مدل نشان داد در مدل دارای چوب میزان جابه‌جایی سازه در بخش زیرین کلاف‌بندی نسبت به مدل بدون چوب کمتر بوده و بخش بیشتر سازه درگیر جابه‌جایی کمینه است. همان‌طور که در تصویر پیداست بخش بیشتری از مدل بدون چوب به رنگ مشکی است که دارای جابه‌جایی کمینه نسبت به سایر قسمت‌های برج کبوتر است. به‌طور کلی مقایسه‌ی داده‌ها نشان داد اضافه کردن کلاف چوبی در بعضی از ثانیه‌ها بر برخی از مؤلفه‌های تنش تأثیرگذار بوده ولی نتوانسته است به‌طور کامل میانگین تنش‌های سازه را کاهش دهد. استفاده از کلاف

چوبی افقی نیز به طور کامل باعث کاهش جابه‌جایی نگردیده است اگرچه در بعضاً ثانیه‌ها که پیش‌تر به آن اشاره شد باعث کاهش جابه‌جایی شده است.



تصویر ۱۷: کانتور تغییرات تنش فون میزس در ثانیه ۴ در مدل بدون کلاف چوبی
تصویر ۱۸: کانتور تغییرات تنش فون میزس در ثانیه ۴ در مدل دارای کلاف چوبی



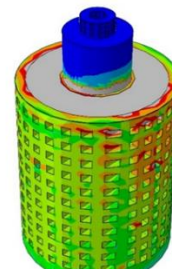
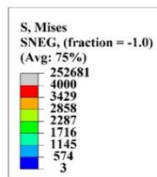
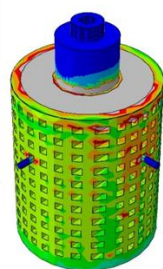
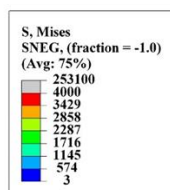
تصویر ۱۹: کانتور جابه‌جایی در ثانیه ۴ در مدل بدون چوب
تصویر ۲۰: کانتور جابه‌جایی در ثانیه ۴ در مدل دارای چوب

تحلیل تغییرات تنش و جابه‌جایی در زلزله ایمپریال ولی: در زلزله ایمپریال ولی شتاب بیشینه در ثانیه ۷/۴ رخ داده و جابه‌جایی بیشینه با مقدار 0.053 سانتی‌متر در ثانیه ۴/۶۹ رخ داده است.

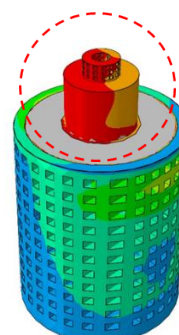
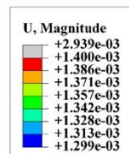
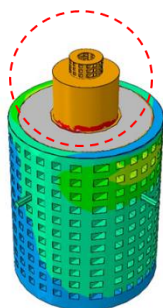
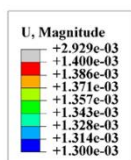
تحلیل سازه تحت بار وزن نشان داد به‌طور میانگین تغییرات تنش در بازه $1/5$ تا $2/5$ پاسکال قرار دارد اگرچه در بازه زمانی 0 تا 1 ثانیه تنش در حدود 5 و 7 پاسکال به سازه وارد و بخش‌های نزدیک به استوانه بالایی و نواحی اطراف آن تنش نزدیک به بیشینه تجربه کرد. در ادامه 1 ثانیه علاوه بر وزن تغییرات مربوط به زلزله به سازه وارد شد. بررسی‌ها نشان داد تغییرات تنش در این زلزله کمتر از زلزله‌ی بم بود. عمده‌ی تغییرات تنش در حدود $2/5$ پاسکال ملاحظه شد.

مدل دارای کلاف در ثانیه ۱ تنش بیشینه به میزان $2/523 \times 10^5$ تجربه کرد. در همین زمان در مدل بدون کلاف‌بندی تنش $2/54 \times 10^5$ پاسکال بود. در ثانیه ۱ نسبت به ثانیه‌های پیش از آن در هر دو مدل بخش بیشتری از بدنه برج دچار تنش بیشینه شد. در مدل دارای چوب در ثانیه ۴ تنش $2/531 \times 10^5$ پاسکال و در مدل بدون چوب تنش $2/527 \times 10^5$ است. جابه‌جایی بیشینه در بازه زمانی $3/5$ تا 4 ثانیه رخ داده است. در رابطه با تغییرات مربوط به جابه‌جایی می‌توان گفت در ثانیه $3/856$ ، سازه با کلاف چوبی به میزان $2/939 \times 10^{-3}$ متر و سازه بدون کلاف $2/939 \times 10^{-3}$ داشته است. در ثانیه $3/856$ مقایسه دو مدل نشان داد در مدل دارای چوب میزان جابه‌جایی سازه در بخش استوانه و بالای برج نسبت به مدل بدون چوب کمتر بوده و در هر دو مدل بدنه و اطراف برج جابه‌جایی کمی داشتند. در قسمت مربوط به جابه‌جایی مدل بدون چوب بخش بیشتری از کلاهک به رنگ قرمز و در مدل با چوب به رنگ نارنجی است و جابه‌جایی بیشتری نسبت به سایر

قسمت‌های سازه تجربه کرده است. به‌طور کلی می‌توان گفت اعمال کلاف چوبی بیشتر بر کاهش جابه‌جایی برج کبوتر تحت زلزله ایمپریال ولی مؤثر بوده و بر روند کاهش تمام مؤلفه‌های تنش در مدل دارای کلاف چوبی تأثیر زیادی نداشته است.



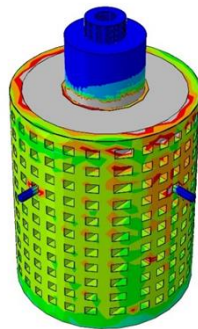
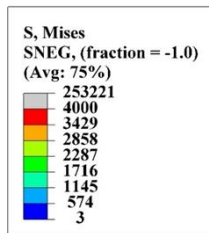
تصویر ۲۱: کانتور تغییرات تنش فون میزس در ثانیه ۴ در مدل بدون چوب
تصویر ۲۲: کانتور تغییرات تنش فون میزس در ثانیه ۴ در مدل دارای چوب



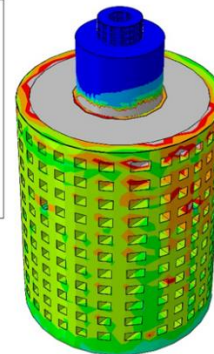
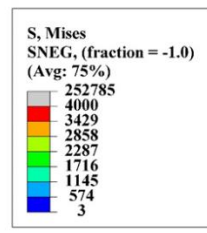
تصویر ۲۳: کانتور جابه‌جایی در ثانیه ۳/۸۵۶
تصویر ۲۴: کانتور جابه‌جایی در ثانیه ۳/۸۵۶

تحلیل تغییرات تنش و جابه‌جایی در زلزله نورث ریج: در زلزله نورث ریج شتاب بیشینه در ثانیه ۴/۶۳ رخ داده و جابه‌جایی بیشینه با ۹ سانتی‌متر در ثانیه ۲۰ رخ داده است. همان‌طور که داده‌ها نشان می‌دهد این زلزله نسبت به زلزله ایمپریال شدیدتر بوده است.

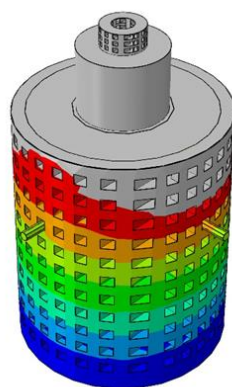
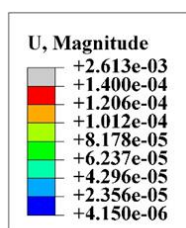
در ابتدا تحلیل سازه تحت بار وزن نشان داد به‌طور میانگین تغییرات تنش در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ پاسکال قرار دارد اگرچه در بازه زمانی ۰ تا ۱ ثانیه تنش در حدود ۵ و ۷ پاسکال به سازه وارد و بخش‌های نزدیک به استوانه بالایی و نواحی اطراف آن تنش نزدیک به بیشینه تجربه کرد. در ادامه ۱ ثانیه علاوه بر وزن تغییرات مربوط به شتاب زلزله به سازه وارد شد. مدل دارای کلاف در ثانیه ۲ تنش بیشینه به میزان $2/53 \times 10^5$ پاسکال تجربه کرد. در همین زمان در مدل بدون کلاف‌بندی تنش $2/527 \times 10^5$ پاسکال بود. در مدل دارای چوب در ثانیه ۴ تنش $2/52 \times 10^5$ پاسکال و در مدل بدون چوب تنش $2/53 \times 10^5$ پاسکال است. در رابطه با تغییرات مربوط به جابه‌جایی می‌توان گفت در ثانیه ۱/۰۵۶، سازه با کلاف چوبی به میزان $2/613 \times 10^{-3}$ متر و سازه بدون کلاف $2/62 \times 10^{-3}$ متر داشته است. در مقایسه با زلزله ایمپریال ولی می‌توان گفت در هر دو شتاب‌نگاشت زلزله در ثانیه‌ی ۴ استوانه بالایی و اطراف آن دچار میزان جابه‌جایی کمی شدند اما در نواحی اطراف اعمال کلاف چوبی در زلزله ایمپریال ولی در ثانیه ۴ بیشتر نقاط در نواحی اطراف چوب دچار تنش کمتری نسبت به زلزله نورث ریج بودند. در زلزله نورث ریج بخش بیشتری از بدنه برج در بازه ۳ تا ۴ ثانیه دچار تنش شد. به‌طور کلی می‌توان گفت اعمال کلاف چوبی بیشتر بر کاهش جابه‌جایی برج کبوتر تحت زلزله نورث ریج مؤثر بوده و بر روند کاهش تغییرات تنش در مدل دارای کلاف چوبی تأثیر چشم‌گیری نداشته است.



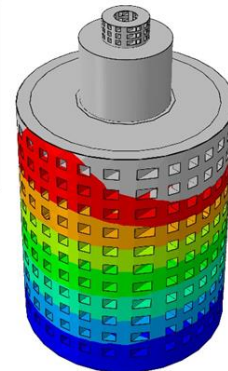
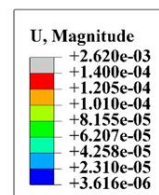
تصویر ۲۶: کانتور تغییرات تنش فون میزس در تائیه ۴ در مدل دارای چوب



تصویر ۲۵: کانتور تغییرات تنش فون میزس در تائیه ۴ در مدل بدون چوب

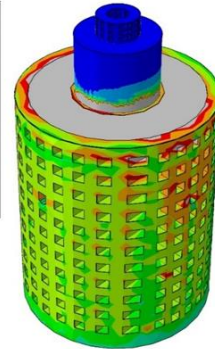
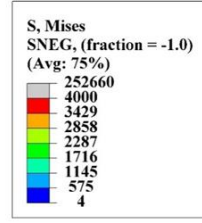
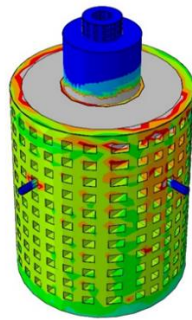
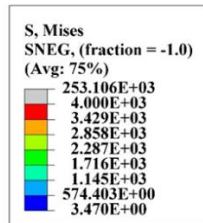


تصویر ۲۸: کانتور جابه‌جایی در تائیه ۱/۰۵۶ در مدل دارای چوب

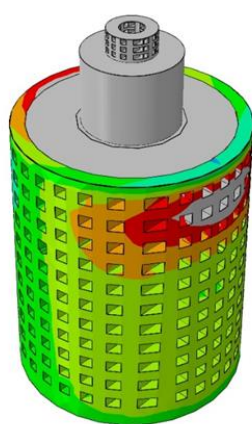
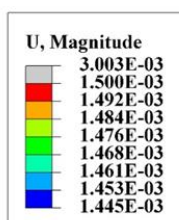


تصویر ۲۷: کانتور جابه‌جایی در تائیه ۱/۰۵۶ در مدل بدون چوب

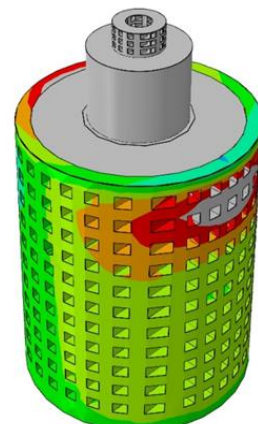
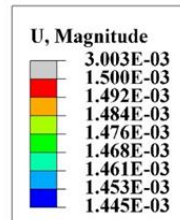
تحلیل تغییرات شتاب و جابه‌جایی در زلزله دریاچه کیوته: در زلزله دریاچه کیوته شتاب بیشینه در تائیه ۵/۸ رخ داده و جابه‌جایی بیشینه با مقدار $۰/۳۴۲$ سانتی‌متر در تائیه ۱۱/۵۱ رخ داده است. در بازه زمانی ۰ تا ۱ تائیه تنش وارده به سازه کمتر از $۲/۵$ پاسکال بود و در تائیه $۰/۹$ این تنش به میزان $۲/۲$ پاسکال رسید. از تائیه ۱ تأثیر هم‌زمان زلزله و وزن اعمال شده است. در مدل دارای چوب در تائیه ۴ تنش $۱۰^۵ \times ۲/۵۳۱$ پاسکال و از طرفی در مدل بدون چوب تنش $۱۰^۵ \times ۲/۵۲۷$ پاسکال است. به‌طور کلی تغییرات تنش در دو مدل با چوب و بدون چوب در حدود $۲/۵$ پاسکال قرار داشت. در رابطه با تغییرات مربوط به جابه‌جایی می‌توان گفت در زلزله‌ی دریاچه کیوته شتاب بیشینه زمین در حدود $۰/۲۴۸$ بوده و این مورد بر روی جابه‌جایی سازه مؤثر بوده است. در تائیه ۴ سازه به‌طور میانگین به میزان ۳ میلی‌متر جابه‌جایی داشته است. این میزان نسبت به زلزله نورث‌ریج و ایمپریال ولی در همین زمان بیشتر بوده است. به نظر می‌رسد اگرچه بزرگای زلزله دریاچه کیوته کمتر از زلزله‌های مذکور بوده است اما به علت بالا بودن شتاب بیشینه در زلزله دریاچه کیوته میزان جابه‌جایی در تائیه ۴ افزایش پیدا کرده است. بیشترین میزان جابه‌جایی رخ داده در بازه $۳/۵$ تا ۴ تائیه است. در تائیه $۳/۸۹۶$ سازه با کلاف چوبی به میزان $۱۰^{-۱} \times ۲/۹۷$ متر و سازه بدون کلاف $۱۰^{-۳} \times ۲/۹۸$ متر داشته است. لازم به‌ذکر است در این تائیه استوانه خارجی در مدل بدون کلاف نسبت به با کلاف دچار جابه‌جایی بیشتری شده است. درواقع استفاده از کلاف چوبی سبب شده تا بخش بیشتری از سازه در قسمت استوانه و فضای اطراف آن تحت تأثیر جابه‌جایی کمینه قرار بگیرد.



تصویر ۲۹: کانتور تغییرات تنش در مدل بدون چوب در ۴ ثانیه

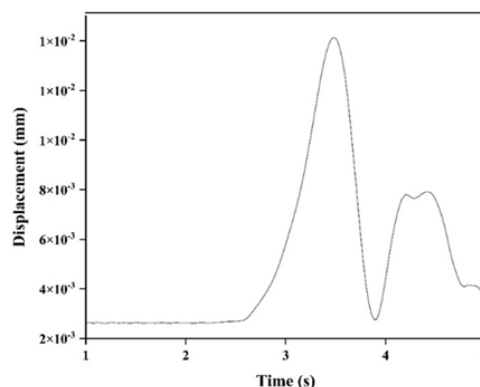


تصویر ۳۱: کانتور جابه‌جایی در مدل دارای چوب در ۴ ثانیه

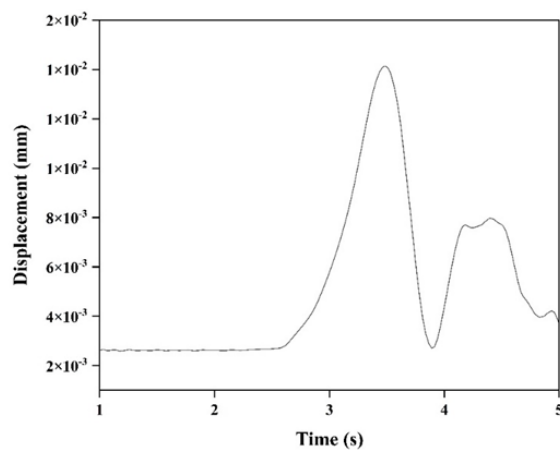


تصویر ۳۰: کانتور جابه‌جایی در مدل بدون چوب در ۴ ثانیه

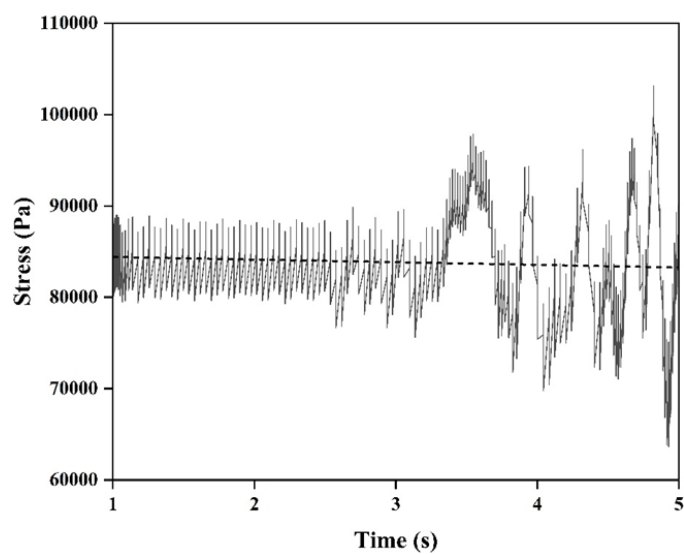
در این قسمت، نقطه ثابت در تراز بام سازه و نزدیک به نیم استوانه جایی که تغییرات تنش زیاد بوده است، انتخاب شده و تغییرات پاسخ جابه‌جایی نسبت به زمان (تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی)، تغییرات کرنش-زمان و تنش-زمان برای زلزله‌های بم و دریاچه کیوته طی نموداری جداگانه ارائه شده است. هدف از تصاویر ۳۱ الی ۴۳، نشان دادن تغییرات جابه‌جایی، تنش و کرنش در نمونه دارای چوب و بدون چوب در زمان ۵ ثانیه از زلزله است. باتوجه به محدودیت تعداد صفحات در مقاله از قرار دادن تصویر برای تمامی زلزله‌ها صرف‌نظر شده است. بررسی نمودارها نشان داده تغییرات دارای تفاوت اندک بوده است.



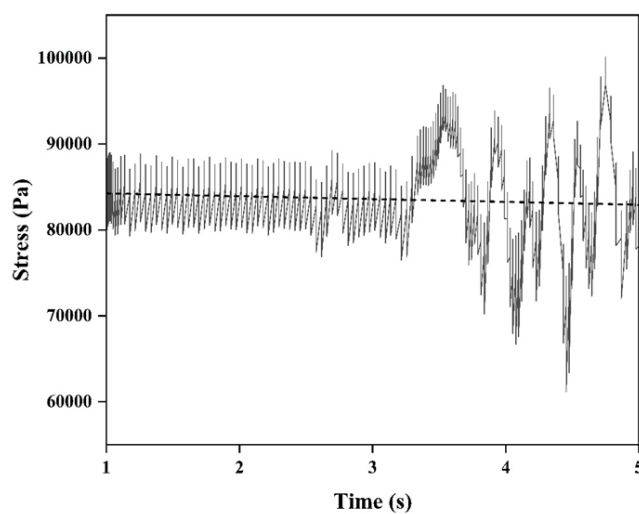
تصویر ۳۲: نمودار جابه‌جایی- زمان در مدل بدون چوب در زلزله بم



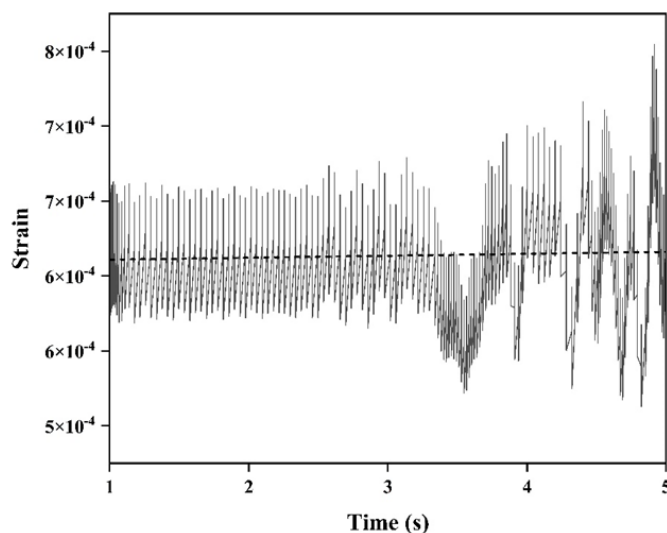
تصویر ۳۳: نمودار جابه‌جایی- زمان در مدل دارای چوب در زلزله بم



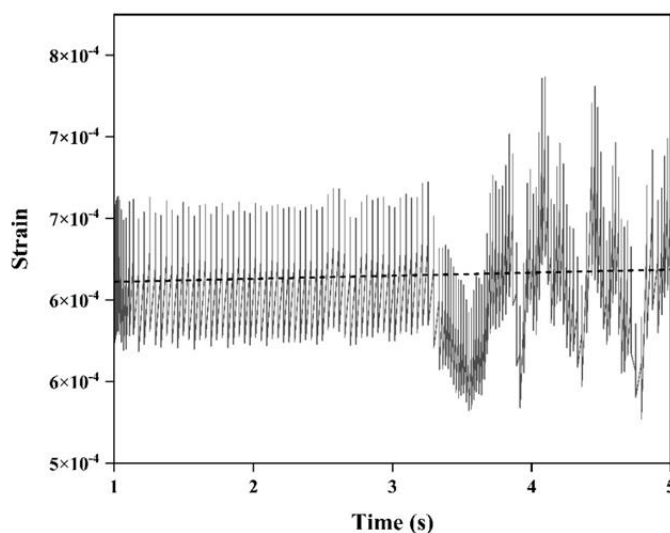
تصویر ۳۴: نمودار تغییرات تنش- زمان در مدل بدون چوب در زلزله بم



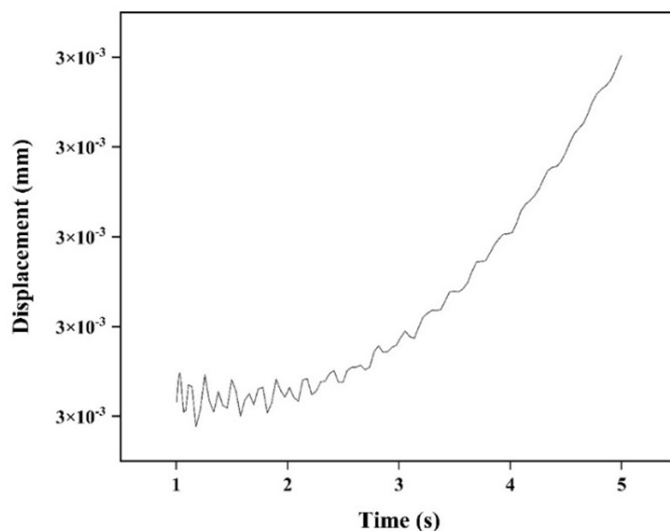
تصویر ۳۵: نمودار تغییرات تنش- زمان در مدل دارای چوب در زلزله بم



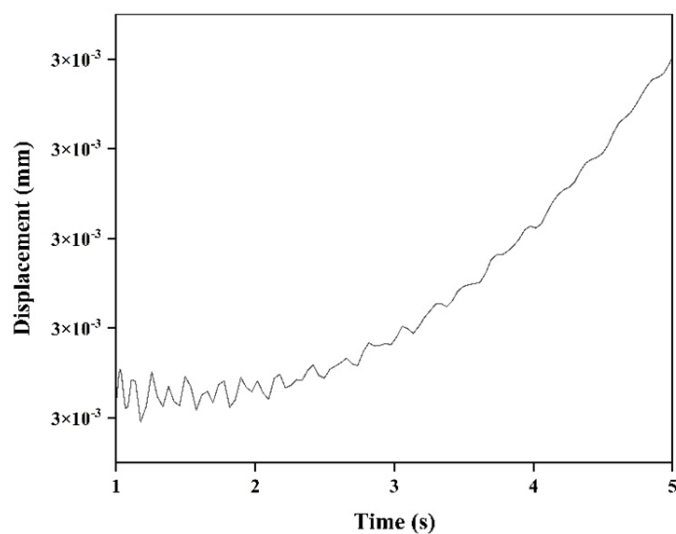
تصویر ۳۶: نمودار تغییرات کرنش حقیقی- زمان در مدل بدون چوب در زلزله بم



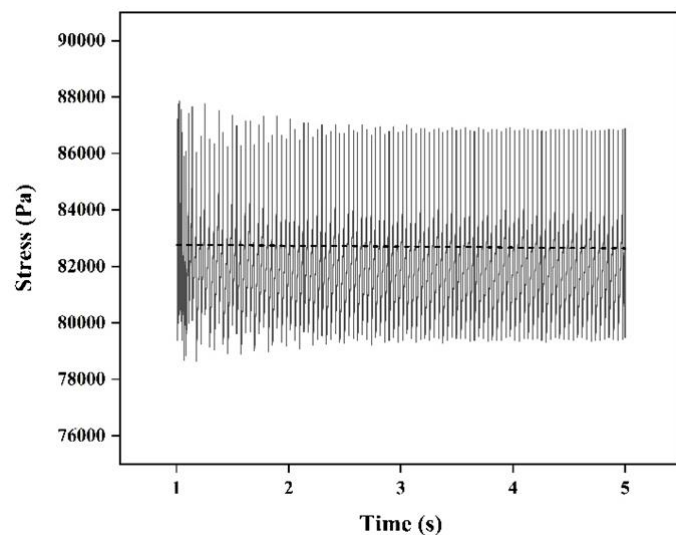
تصویر ۳۷: نمودار تغییرات کرنش حقیقی- زمان در مدل دارای چوب در زلزله بم



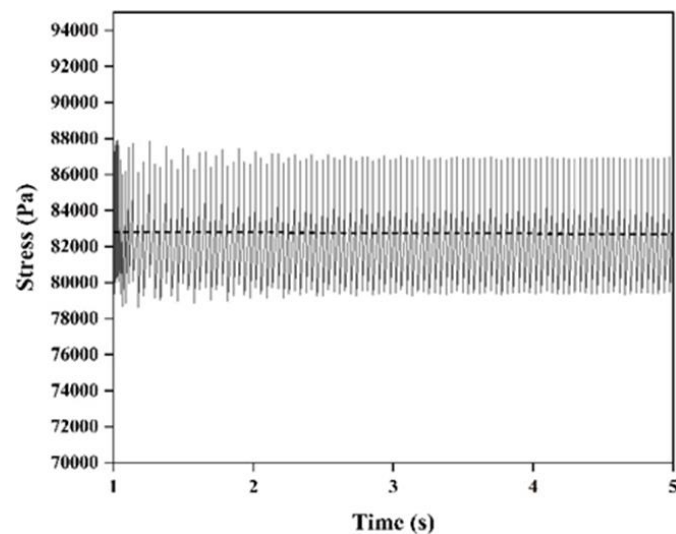
تصویر ۳۸: نمودار جابه‌جایی- زمان در مدل بدون چوب در زلزله دریاچه کیوته



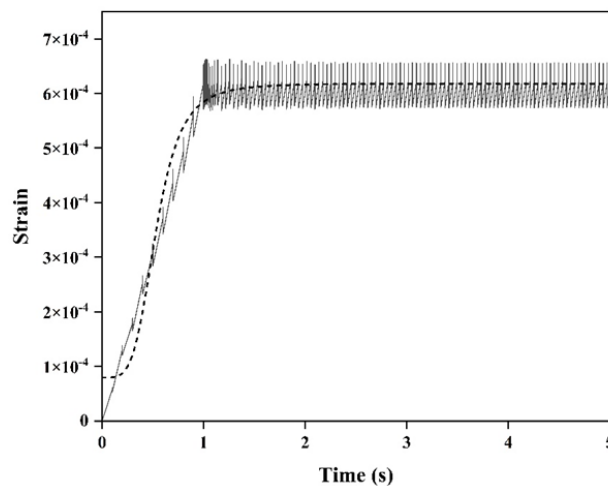
تصویر ۳۹: نمودار جابه‌جایی- زمان در مدل دارای چوب در زلزله دریاچه کیوته



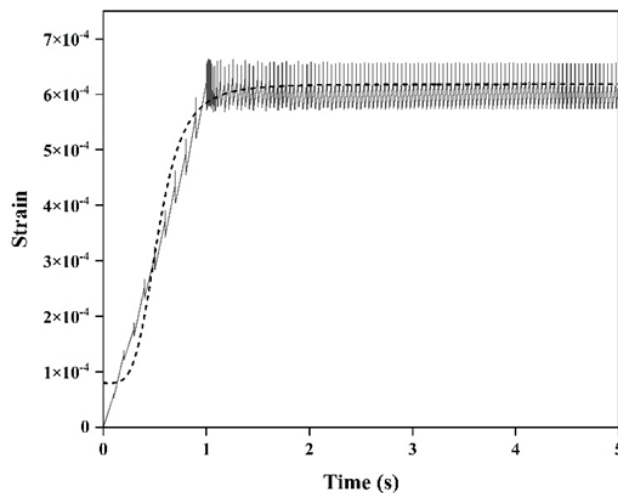
تصویر ۴۰: نمودار تغییرات تنش- زمان در مدل بدون چوب در زلزله دریاچه کیوته



تصویر ۴۱: نمودار تغییرات تنش- زمان در مدل دارای چوب در زلزله دریاچه کیوته



تصویر ۴۲: نمودار تغییرات کرنش حقیقی- زمان در مدل بدون چوب در زلزله دریاچه کیوته



تصویر ۴۳: نمودار تغییرات کرنش حقیقی- زمان در مدل دارای چوب در زلزله دریاچه کیوته

جمع بندی رفتار دینامیکی مدل تقویت نشده و مدل تقویت شده در اثر اعمال رکورد زلزله تحت چهار زلزله:

بررسی ها نشان داد تغییرات تنش در زلزله بم بیشتر از سه زلزله دیگر بود و تغییرات تنش در بازه ۱/۸ الی ۲/۶ پاسکال ملاحظه شد. در مدل دارای چوب در ثانیه ۴ کانتورهای تنش در اطراف ناحیه اعمال کلاف چوبی نسبت به مدل بدون کلاف دارای تنش کمتری هستند. در ثانیه ۴ مقایسه دو مدل نشان داد در مدل دارای چوب میزان جابه جایی سازه در بخش زیرین کلاف بندی نسبت به مدل بدون چوب کمتر بوده و بخش بیشتر سازه در گیر جابه جایی کمینه است. در ادامه زلزله ای ایمپریال ولی ارزیابی شد. عمده ی تغییرات تنش در حدود ۲/۵ پاسکال ملاحظه شد. در ثانیه ۳/۸۵۶ مقایسه دو مدل نشان داد در مدل دارای چوب میزان جابه جایی سازه در بخش استوانه بالای برج نسبت به مدل بدون چوب کمتر بوده و در هر دو مدل بدنه و اطراف برج جابه جایی کمی داشتند. به طور کلی می توان گفت اعمال کلاف چوبی بیشتر بر کاهش جابه جایی برج کبوتر تحت زلزله ایمپریال ولی مؤثر بوده و بر روند کاهش تغییرات تنش در مدل دارای کلاف چوبی تأثیر زیادی نداشته است. در زلزله نورث ریج در مقایسه با زلزله ایمپریال ولی می توان گفت در هر دو شتابنگاشت زلزله در ثانیه ۴ نیم استوانه بالایی و اطراف آن دچار میزان جابه جایی کمی شدند؛ اما در نواحی اطراف اعمال کلاف چوبی گفت در زلزله ایمپریال ولی در ثانیه ۴ بیشتر نقاط در نواحی اطراف چوب دچار تنش کمتری نسبت به زلزله نورث ریج بودند. در زلزله نورث ریج بخش بیشتری از بدنه برج در بازه ۳ تا ۴ ثانیه دچار تنش شد. در زلزله مربوط به دریاچه کیوته نیم استوانه خارجی در مدل

بدون کلاف نسبت به با کلاف دچار جابه‌جایی بیشتری در ثانیه‌های پایانی شده است. درواقع استفاده از کلاف چوبی سبب شده تا بخش بیشتری از سازه در قسمت نیم استوانه و فضای اطراف آن تحت تأثیر جابه‌جایی کمینه قرار بگیرد. به‌طور کلی در این مطالعه، تأثیر اضافه کردن یک کلاف چوبی افقی به سازه خشتی بر رفتار لرزه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در برخی زمان‌ها، کلاف چوبی توانست به‌طور موقت بهبودهایی در توزیع تنش و جابه‌جایی ایجاد کند. باین‌حال، تحلیل‌های کلی‌تر نشان داد تغییرات در کاهشی شدن میزان تنش و جابه‌جایی چشمگیر نبوده و این بهبودها نمی‌تواند سازه با کلاف را به‌طور کامل در برابر زلزله پایدار کند.

جدول ۷: جمع‌بندی رفتار دینامیکی سازه در اثر اعمال رکورد چهار زلزله (مأخذ: نگارندگان)

تغییرات تنش					نام زلزله
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۳/۷۴	بم
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۲/۲۱۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۲/۵۱۱	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	
تغییرات تنش					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۱	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	
تغییرات تنش					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۱/۰۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	
تغییرات تنش					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۹۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	

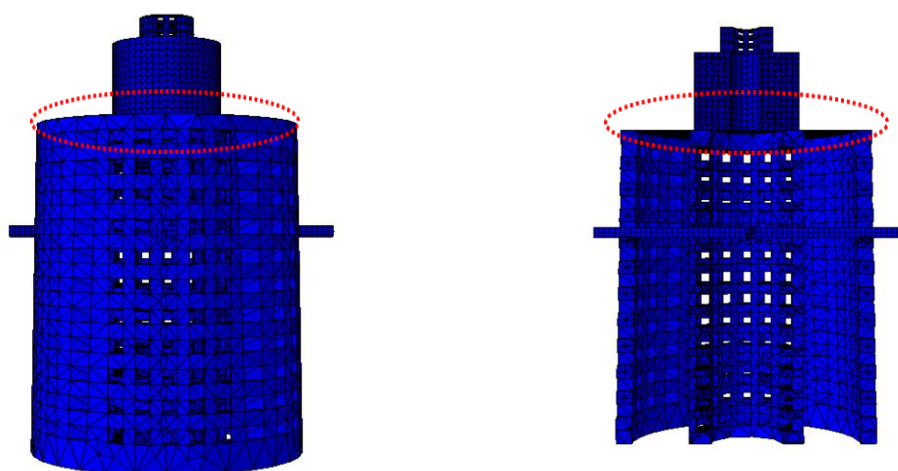
ایمپریال ولی	تغییرات تنش				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان
	تنش بیشینه		تنش بیشینه		۱
	تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴
	تغییرات جابه‌جایی				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان
	جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۵۶
	جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴
	تغییرات تنش				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۱/۰۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	
تغییرات تنش					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۱/۰۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	
تغییرات تنش					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۱/۰۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	
تغییرات تنش					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۱/۰۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	

نورث ریج	تغییرات تنش				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان
	تنش بیشینه		تنش بیشینه		۱
	تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴
	تغییرات جابه‌جایی				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان
	جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۵۶
	جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴
	تغییرات تنش				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	
تغییرات تنش					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	

دریاچه کیوته	تغییرات تنش				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان
	تنش بیشینه		تنش بیشینه		۱
	تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴
	تغییرات جابه‌جایی				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان
	جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۵۶
	جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴
	تغییرات تنش				
	مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (پاسکال)		زمان
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۲	
تنش بیشینه		تنش بیشینه		۴	
تغییرات جابه‌جایی					
مدل بدون کلاف‌بندی چوبی (متر)		مدل دارای کلاف‌بندی چوبی (متر)		زمان	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۳/۸۵۶	
جابه‌جایی بیشینه		جابه‌جایی بیشینه		۴	

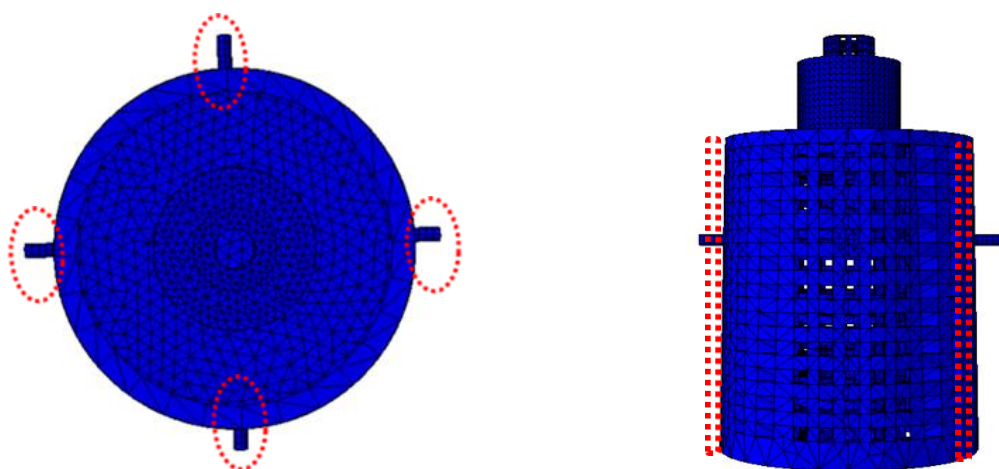
در ادامه باید اشاره کرد پرسش اصلی پژوهش این بود که چگونه می‌توان عملکرد لرزه‌ای سازه‌ی برج کبوتر را ارتقاء بخشید. بر اساس نتایج و بررسی‌های انجام‌شده، پاسخ این است که در برخی شرایط خاص و محدود، استفاده از یک کلاف افقی ممکن است تا حدی توانسته باشد مقاومت سازه را افزایش دهد؛ اما به‌طور کلی، این روش به‌تنهایی کافی نیست و نمی‌تواند مقاومت سازه‌ی کامل و پایدار را تضمین کند. برای دستیابی به استحکام و پایداری مطلوب، لازم است کلاف‌های افقی در ارتفاعات مختلف سازه به کار گرفته شوند تا توزیع تنش‌ها به شکل یکنواخت‌تر انجام شود. علاوه بر این، افزودن کلاف‌های قائم نیز ضروری است تا اتصال و پیوستگی سازه بهبود یافته و مقاومت در برابر نیروهای جانبی، به‌ویژه در شرایط لرزه‌ای، افزایش یابد. پس از بررسی سازه تحت تأثیر چهار زلزله به نظر می‌رسد با انجام مواردی بتوان عملکرد سازه در برابر زلزله را بهبود بخشید:

– باتوجه‌به اینکه در ثانیه‌های متعدد استوانه بالایی و نواحی اطراف آن دچار تغییرات تنش و جابه‌جایی شده است پیشنهاد می‌شود علاوه بر کلاف افقی چوبی استفاده‌شده در این تحقیق، یک کلاف افقی دیگر نیز در ارتفاع بالاتر و نزدیک به استوانه بالایی اضافه گردد.



تصویر ۴۴: محل اضافه شدن کلاف افقی در ارتفاع بالاتر

جهت کاهش تنش‌های کششی و جبران ضعف سازه خشتی در برابر کشش، در پوسته خارجی علاوه بر کلاف افقی چوبی، کلاف قائم چوبی به سازه اضافه کنیم. محل پیشنهادی برای اضافه شدن کلاف‌های قائم بر روی تصویر نشان داده شده است.



تصویر ۴۴: محل اضافه شدن کلاف افقی در ارتفاع بالاتر

۱۳- نتیجه گیری

در این مطالعه، راهکارهای اجرایی متعددی برای استحکام بخشی بخش های آسیب دیده سازه ارائه شد که هر یک نقش مهمی در افزایش پایداری و دوام سازه دارند. ابتدا، تحکیم خاک زیر سازه با استفاده از لاشه سنگ و خاک کوبیده به عنوان یک اقدام اساسی برای رفع مشکلات ناشی از لایه های سست خاک مطرح شد. همچنین، اثرات مویینی و نمکی ناشی از قرارگیری برج کبوتر روی زمین کشاورزی به عنوان عامل تسریع کننده تخریب شناسایی و ضرورت مقابله فوری با آن پیش از سایر اقدامات استحکام بخشی تأکید گردید. پایش دقیق ترک ها و مدیریت تغییر شکل سازه نیز از اهمیت بالایی برخوردار است، چراکه نه همه ترک ها خطرناک هستند و نه همه آن ها نیازمند مداخله فوری؛ بلکه با اندازه گیری و نظارت مستمر می توان از گسترش آسیب جلوگیری کرد. در نهایت، استحکام بخشی لرزه ای با تعویض و تقویت کلاف های چوبی اتصال دهنده بین دو پوسته، به ویژه استفاده از کلاف های مقاوم، به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از رانش پوسته خارجی معرفی شد. علاوه بر کلاف بندی افقی، افزودن کلاف های قائم نیز ضروری است تا استحکام و پایداری سازه به طور جامع تر تأمین شود. پس از بررسی اطلاعات تاریخی، انجام آسیب شناسی، بررسی تکنیک های بومی مرمت و آنالیزهای سازه ای، راهکار نهایی استحکام بخشی ارائه گردید. جمع بندی مطالعات انجام شده در زمینه معماری خشتی نشان داد بهترین الگوی حفاظت از معماری و سازه سنتی، الگوی ارائه شده توسط مردم بومی آن منطقه بوده است. استفاده از کلاف بندی چوبی، به عنوان راهکار مناسب استحکام بخشی، به دو شاخصه حفظ اصالت و حداقل مداخله در بنا احترام گذارده است. با توجه به اینکه بنا کاربری عمومی ندارد و محل آلوده شدن افراد نیست در ارائه طرح استحکام بخشی ایمنی جانی مطرح نبوده و مداخله حداقلی ضمن حفظ اصالت و برگشت پذیری اقدامات دارای اهمیت است. به منظور تعیین مداخله مناسب در بنا و شناخت دقیق تر رفتار در حین مخاطرات طبیعی مانند زلزله یک بار مدل تقویت نشده و یک بار مدل تقویت شده در نرم افزار در برابر چهار زلزله مدل شد تا از رفتار دقیق برج اطمینان حاصل شود. ارزیابی های رفتار دینامیکی نشان داد استفاده از کلاف بندی چوبی افقی بین دو پوسته داخلی و خارجی که در ارتفاع دو سوم از سطح زمین قرار گرفته است بیشتر بر روی تنش برشی مؤثر بوده؛ اما به طور کلی مقایسه دو مدل نشان داد تنش به طور چشمگیر کاهش نیافته است.

پی نوشت

1. Velashan

۲. اصفهک: روستایی از توابع بخش دیهوک و در شهرستان طبس استان خراسان جنوبی ایران است

3. Ansys: Engineering Simulation Software

4. Geo-mesh

5. near-surface-mounted (NSM)

به تکنیکی اشاره دارد که در آن میله ها و یا نوارهای تقویت کننده در شیارهای ایجاد شده بر روی سطح دیواره قرار می گیرند و سپس روی آن با ملات پوشانده می شود.

6. Abaqus Cae

7. <https://ngawest2.berkeley.edu/>

8. Seismosignal

9. Seismic Strengthening

10. Tie

این دستور در نرم افزار آباکوس، برای ایجاد پیوند بین دو سطح استفاده می شود.

11. Displacement

منابع

- ابویی، رضا؛ رحیمی، حسینعلی و پارسایی، علیرضا. (۱۳۹۵). نارسایی‌های موجود در فرآیند بهسازی لرزه‌ای ابنیه تاریخی، باغ نظر، ۱۴(۴۸)، ۵۷-۶۸.
- امیدواری، سمیه. (۱۴۰۰). تحلیلی بر روش‌های مقاوم‌سازی بناهای خشتی مبتنی بر به‌کارگیری عناصر تقویت‌کننده بر اساس آیین‌نامه و استانداردهای خشت در کشورهای نیوزیلند، مراکش، پرو و آمریکا، معماری اقلیم گرم و خشک، ۱۴(۹)، ۲۴۱-۲۵۹.
- جعفرزاده اسلامی، بابک. (۱۳۹۸). اثر اندرکنش ملات بین آجر در پاسخ لرزه‌ای دیوارهای، دومین کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز: دانشگاه تبریز.
- حجازی، سید امیر مهرداد؛ حجازی، بینا، مهداد، حامد و حجازی، صبا. (۱۳۹۴). مطالعه تخریب لرزه‌ای یک حجره خشتی در ارگ بم و ارائه طرح مرمت آن، نشریه مرمت و معماری ایران، ۵(۹)، ۸۶-۷۱.
- حجازی، سید امیر مهرداد؛ هاشمی، محمود، جمالی‌نیا، الهه و ناتوانی، محمود. (۱۳۹۳). تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته‌شده از خاک اصفهان. مسکن و محیط روستا، ۳۴(۱۵۱)، ۶۷-۸۰.
- خالو، علیرضا و یکرنگ‌نیا، محمد. (۱۴۰۲). ارزیابی میدانی و عددی آسیب‌پذیری لرزه‌ای قلعه فلک الافلاک. مهندسی سازه و ساخت، ۱۰(۶)، ۹۶-۱۱۴.
- ذات‌اکرم، وحید. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی لرزه‌ای ابنیه‌ی خشتی روستایی (نمونه موردی: روستای تاریخی اصفهک-طبس). محمد مرادی، اصغر. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.
- ذات‌اکرم، وحید و زمانی‌فرد، علی. (۱۳۹۶). بررسی علل رخداد نرخ متفاوت آسیب‌های لرزه‌ای در ابنیه خشتی روستای تاریخی اصفهک پس از زلزله طبس، نشریه فصلنامه علمی اثر، ۳۹(۸۰)، ۴۱-۶۰.
- ذات‌اکرم، وحید و زمانی‌فرد، علی. (۱۴۰۲). دستیابی به مؤلفه‌های ارزیابی و گزینش روش مناسب مداخله مرمتی در میراث معماری مبتنی بر اسناد بین‌المللی حفاظت. نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران، ۱۴(۲)، ۹۵-۱۱۵.
- فرهادی، مرتضی. (۱۳۷۲). کبوترخانه‌های ایران، درهم‌آمیزی زیبایی و کارایی. صفه، ۴(۱)، ۶۶-۷۷.
- قصری، پردیس. (۱۴۰۲). استحکام‌بخشی لرزه‌ای ابنیه‌ی خشتی تاریخی (مورد پژوهی: ارائه‌ی طرح استحکام‌بخشی برج کبوتر استوانه‌ای امینی در روستای ولایشان اصفهان). زمانی‌فرد، علی. دانشگاه هنر ایران.
- محمودیان، سید محمد و چیت‌ساز، علی. (۱۳۷۹). برج‌های کبوتر اصفهان. اصفهان: نشر گل‌ها.
- ولی، هلیا؛ مهدیزاده سراج، فاطمه و سجاد، مؤذن. (۱۴۰۱). ارزیابی روش‌های نوین و سنتی استحکام‌بخشی سازه‌های آجری غیرمسلح از دیدگاه متخصصین حوزه مرمت. معماری اقلیم گرم و خشک، ۱۰(۱۶)، ۱۹۹-۲۱۴.
- Ahmadi, S. S., Karanikoloudis, G., Mendes, N., Illambas, R., & Lourenço, P. B. (2022). Appraising the Seismic Response of a Retrofitted Adobe Historic Structure, the Role of Modal Updating and Advanced Computations. *Buildings*, 12(11), 1795.
- Armour, T., Groneck, P., Keeley, J., & Sharma, S. (2000). Micropile design and construction guidelines: Implementation manual (No. FHWA-SA-97-070). United States. Federal Highway Administration.
- Banadaki, H. M., Morshed, R., & Eslami, A. (2019). In-plane cyclic performance of adobe walls retrofitted with near-surface-mounted steel rebars. *Engineering Structures*, 194, 106-119.
- Ginell, W. S., & Tolles, E. L. (2000). Seismic stabilization of historic adobe structures. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(1), 147-163.
- Hadizadeh Kakhki, saeed. "Dovecote in Iran", Bureau of Cultural Research, Encyclopaedia of History of Architecture and Urban Planning of Iran, 13-7, 1381.
- Illampas, Rogiros, Ioannis Ioannou, and Dimos C. Charmpis. (2015). "Overview of the Restoration and architecture of Iran restoration of historical and cultural works and textures 9, no. 5: 71-86.

- 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 .
- Kumar, Ambareesh, and Kumar Pallav.(2024). "Old masonry tower analysis visual inspection, NDT, and macro-modeling." Asian Journal of Civil Engineering 25, no. 1 (2024): 167-181.
- Lourenço, P. B., Ciocci, M. P., Greco, F., Karanikoloudis, G., Cancino, C., Torrealva, D., & Wong, K. (2019). Traditional techniques for the rehabilitation and protection of historic earthen structures: The seismic retrofitting project. International Journal of Architectural Heritage, 13(1), 15-32.
- Meybodan, Hadi, Abolfazl Eslami, and Reza Morshed. (2020). "Sustainable lateral strengthening of traditional adobe walls using natural reinforcements." Construction and Building Materials 260 (2020): 119892.
- Mohammadi, Sayeda Sara, Mortezaei, and Mohammad. "Thinking about Iran's pigeon houses by relying on written sources." Studies of cultural heritage documents 1, no. 1 (2023): 0-0
- Michiels, Tim L.G. "Seismic retrofitting techniques for historic adobe buildings." International Journal of Architectural Heritage 9, no. 8 (2015): 1059-1068.
- Macchioni, E., Lourenço, P. B., Karanikoloudis, G., Mendes, N., Aguilar, R., & Cancino, C. (2024). Sustainable and Collaborative Solutions for the Long-term Care of Heritage Earthen Sites in Seismic Areas in Peru. Studies in Conservation, 69(sup1), 218-226.
- Nair, S. Unnikrishnan, and S. Somanath, eds.(2023). Introduction to Finite Element Analysis: A Textbook for Engineering Students. Springer Nature.
- Ostad, D., & Shafaei, J. (2021). Analytical study of seismic performance of retrofitted unreinforced masonry walls using steel plates. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52(12), 3161-3182.
- TIAGO MARTINS & et al.(2020). “ SEISMIC RETROFITTING OF HISTORICAL MASONRY HERITAGE STRUCTURES: A CASE STUDY OF AN ADOBE MASONRY BUILDING IN LIMA, PERU”, 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC 2020
- Tolles, E. Leroy, Edna E. Kimbro, and William S. Ginell. (2003). Planning and engineering guidelines for the seismic retrofitting of historic adobe structures. Getty Publications,.

Original Research Article

Enhancing the Seismic Performance of ancient Adobe Buildings: A Case Study of a Dovecote in Velashan Village of IsfahanPardis Ghasri^{1*}, Ali Zamanifard², Vahid Zatakram³

- 1- Master' graduate in Conservation and Restoration of historical buildings, Department of Conservation and Restoration of Historical Buildings, Faculty of Conservation and Restoration, Iran University of Art.
- 2- Associate professor, Department of Conservation and Restoration of Historical Buildings, Faculty of Conservation and Restoration, Iran University of Art.
- 3- PhD student of Conservation and Restoration of Historical Buildings, Department of Conservation and Restoration of Historical Buildings, Faculty of Conservation and Restoration, Iran University of Art.

 10.22034/AHDC.2025.22404.1842

Received:
November 25, 2024

Accepted:
August 04, 2025

Keywords:
Historical adobe
buildings,
Cylindrical
dovecote, Seismic
consolidation,
Amini Dovecote

Abstract

For many years, adobe structures have been common models in the history of Iranian architecture. Thus, nowadays, a significant part of these buildings are considered as an important type of Iranian architectural heritage worth protecting. One of the serious challenges of such buildings is protecting them against natural hazards, especially earthquakes. Up to now, more has been done to improve the seismic performance of human-inhabited adobe buildings compared to other types of such buildings. For this reason, the current research aims at the seismic strengthening of pigeon houses as an adobe heritage in the agricultural domain, focusing on the Amini Velashan pigeon house. The seismic evaluation was conducted under the influence of four different earthquakes. In terms of its purpose, the research is of an applied type. The data required for the research were obtained through library and field studies, and the strategy was inductive. Also, the data analysis was done based on computer modeling and descriptive-analytical methods. After the study of the available documents about the history and architecture of the pigeon towers and the local techniques and materials used in the construction, pathology of the buildings was done. Based on the principles of conservation and restoration, a retrofitting plan was proposed, and the clay dovecote with a cylindrical shape was strengthened using seismic modeling in the Abaqus software. The current research sought to provide an intervention solution based on software data analysis, identification of seismic behavior, failure points, the existing documents, and pathology. The results predicted the weak performance of the existing structure in future earthquakes and similar damages in case of restoration without retrofitting. In the model without horizontal wooden beams, the structure cannot be stable against earthquakes. In the model with horizontal beams at a height of two-thirds of the ground surface, the stress and displacement changes improved for a few seconds. Currently, the structure is not in good conditions and will not be stable against future earthquakes. It seems that, by adding horizontal beams at a higher height and also vertical beams on the outer shell, seismic stability can be increased.

E-ISSN: 2645-372X /© 2023. Published by Yazd University This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

