

## طرح مرمت برج خشتی شماره‌ی ۳۲ در ارگ بم\*

مهرداد حجازی<sup>(۱)</sup> بینا حجازی<sup>(۲)</sup> حامد مهداد<sup>(۳)</sup> صبا حجازی<sup>(۴)</sup>

**چکیده** ارگ بم بزرگ‌ترین ارگ خشتی جهان در شهرستان بم کرمان، تحت زلزله‌ی پنجم دی ماه ۱۳۸۲ به شدت آسیب دید. از آن زمان مطالعات و تحقیقات بسیاری برای مرمت و احیای این مجموعه‌ی تاریخی انجام شده است. برج خشتی ۳۲ یکی از اولین سازه‌ها در این ارگ بود که در طی یک پروژه، طرح مرمت آن تهیه و ارائه شد. هدف این پروژه، مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ای برج به منظور تعیین دلیل آسیب‌های وارد شده، نواحی ضعیف این سازه در زلزله‌های آتی، بهترین راه برای بهبود رفتار لرزه‌ای، و مناسب‌ترین طرح مرمت بوده است. این مقاله دربرگیرنده مطالعات رفتار لرزه‌ای و طرح مرمت برج ۳۲ می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** برج خشتی، رفتار لرزه‌ای، مرمت، ارگ بم.

### Restoration Plan of Adobe Tower No. 32 in the Bam Citadel

M. Hejazi B. Hejazi H. Mehdad S. Hejazi

**Abstract** The world largest adobe citadel in Bam (Arg-e Bam) was damaged seriously in the 26 December 2003 earthquake. Since then many studies and researches have been done to restore this historical complex. One of the first structures in the citadel for which a restoration plan was prepared over a project was adobe tower No. 32. The objective of this project was studying the seismic behaviour of the tower to find out the cause of damage, the weakest parts of the structure in future earthquakes, the best way to improve the seismic performance, and the most appropriate restoration plan. This paper presents the study on seismic behaviour of tower No. 32 and its restoration plan.

**Keywords** Adobe Tower, Seismic Behaviour, Restoration, Bam Citadel

★ تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۱۲/۰۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۸/۲۱ می‌باشد.

- (۱) نویسنده‌ی مسئول: دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.
- (۲) کارشناس مهندسی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان).
- (۳) کارشناس ارشد سازه دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد.
- (۴) دانشجوی کارشناسی مهندسی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان.

**مقدمه**

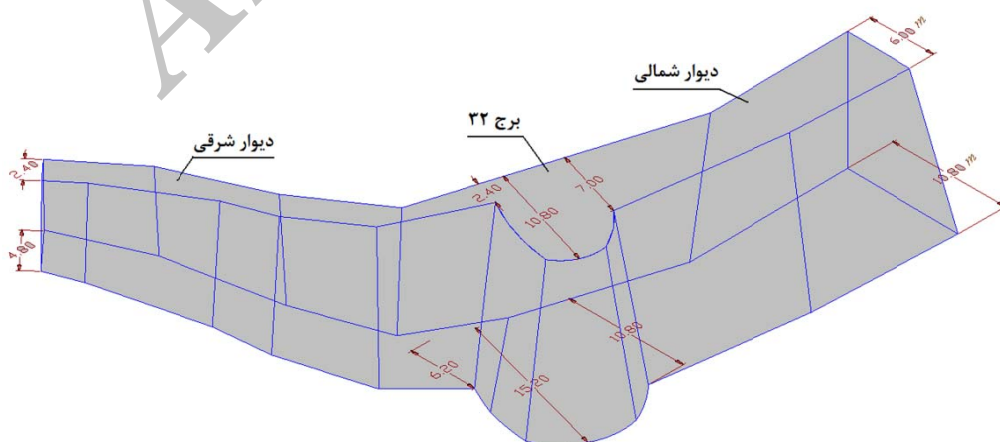
ارگ بم. ارگ بم با وسعتی قریب به ۲۰۰۰۰۰ مترمربع (شکل ۱) بزرگترین مجموعه‌ی خشتی- گلی جهان به‌شمار می‌رود. این مجموعه در طی ۲۰۰۰ سال عمر خود تغییرات و بازسازی‌های بسیاری را به خود دیده است. افزایش حجم و ظاهر برج و باروهای پیرامونی، هندسه‌ی نامتقارن، روش‌های نامناسب احیا و مرمت و برخی الحاقات پی‌درپی در طی ادوار تاریخی مختلف، باعث شده است که این مجموعه در زلزله‌ی پنجم دی ماه ۱۳۸۲ بم، دچار خرابی‌های گسترده شود [۱ و ۲].

برج ۳۲. ساختار برج ۳۲ از خشت بوده است و در

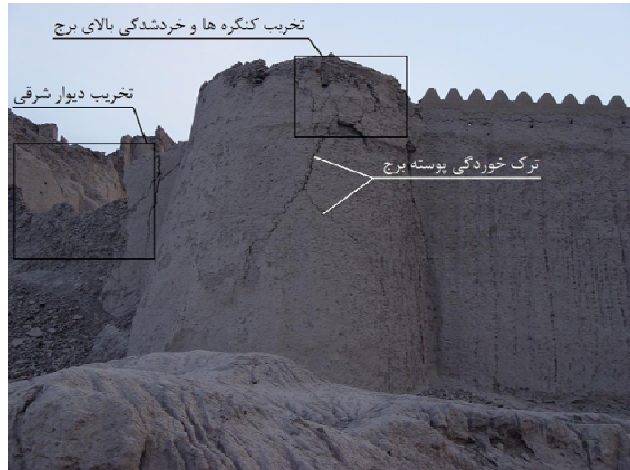
گوشه‌ی شمال شرقی ارگ واقع شده است. این برج دایره‌ای شکل (از نمای بیرونی) ۱۵ متر ارتفاع دارد. قطر آن در پایین ۱۵/۲ متر و در بالا ۱۰/۸ متر می‌باشد (شکل ۲). در اثر زلزله تعدادی ترک خوردگی برشی بر روی لایه‌ی خارجی برج ایجاد شده و همین‌طور دیوار سمت شرقی آن تقریباً به‌طور کامل تخریب شده است، ولی دیوار سمت غربی برج (بخشی از دیوار شمالی ارگ) دچار هیچ خسارتی نشده است (شکل‌های ۳ و ۴). بررسی‌های باستان‌شناسی نشانگر وجود هسته‌ای به ضخامت حدوداً ۱/۵ متر درون برج و در دیوارهای جانبی آن می‌باشد [۱].



شکل ۱ ارگ بم قبل از زلزله‌ی پنجم دی ۱۳۸۲



شکل ۲ هندسه‌ی برج ۳۲ و بخشی از دیوارهای جانبی آن



شکل ۳ خسارات وارد به لایه‌ی خارجی برج و دیوار شرقی آن در اثر زلزله



شکل ۴ برج ۳۲ و دیوارهای شرقی و شمالی ارگ بم

این پروژه ایجاد و ارزیابی روش‌ها و ابزار طراحی برای معماران، مهندسان و صاحبان بناها بود. این پروژه سه مرحله داشت. مرحله‌ی اول شامل ارزیابی اطلاعات و روش‌های مقاوم‌سازی موجود و گسترش دستورات عمل‌های فنی موقت برای استفاده در مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی بود. طی مرحله‌ی دوم، تحقیقات لازم برای توسعه‌ی فن‌آوری مقاوم‌سازی قابل قبول و برای تکمیل آنچه که در آن موقع شناخته شده بود، انجام شد. در مرحله‌ی سوم، مجموعه‌ای از دستورات عمل‌های برنامه‌ریزی و مهندسی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی تاریخی براساس نتایج تحقیقات و قضاوت حرفه‌ای تنظیم شد. این پروژه شامل انجام تعداد زیادی آزمایش میز لرزان

### مرور پیشینه‌ی تحقیق

از دهه‌ی ۱۹۷۰ علاقه به مطالعه‌ی رفتار و بهسازی لرزه‌ای بناهای خشتی افزایش یافت و گروه‌های تحقیقاتی مختلفی پژوهش در این زمینه را آغاز نمودند. محققان دانشگاه کاتولیک پرو نقش مهمی در به‌دست آوردن اطلاعات در این زمینه و ارائه‌ی راهکارهای مقابله با زلزله ایفا نموده‌اند. نتایج تحقیقات سی و پنج ساله‌ی این گروه تا سال ۲۰۰۵ با جزئیات توسط وارگاس و همکاران [3] ارائه شده است. پروژه‌ی خشت‌لرزه ای گتی، که هنوز نیز ادامه دارد، در سال ۱۹۹۰ توسط مؤسسه‌ی حفاظت گتی به‌منظور توسعه‌ی روش‌های فنی برای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های خشتی با حداقل مداخله شروع شد. هدف دراز مدت

بم در سال ۱۳۸۲ طی چند پروژه با مشارکت متخصصان ایرانی و خارجی از کشورهای فرانسه، آلمان و ژاپن و با هدایت پروژه‌ی نجات‌بخشی میراث فرهنگی ارگ بم شروع شد. این پروژه‌ها شامل مرمت برخی از سازه‌های مهم ارگ بم مانند برج ۱، خانه‌ی سیستانی، برج ۳۲ و بخشی از بازار با استفاده از روش‌های مختلف و متداول در کشورهای مذکور بود تا از نتایج آن بتوان در آینده برای تهیه‌ی یک دستورالعمل مناسب برای مرمت و مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی استفاده نمود [14-10 و 1].

### مراحل طرح مرمت

طرح مرمت براساس منشورها و دستورالعمل‌های جهانی، مانند منشور ونیز (منشور بین‌المللی برای حفاظت و مرمت بناها و محوطه‌ها) [15] و دستورالعمل‌های ISCARSAH (توصیه‌هایی برای تحلیل و مرمت سازه‌های تاریخی (کمپته‌ی بین‌المللی تحلیل و مرمت سازه‌های میراث معماری) [16] تهیه شده است. این منشورها و دستورالعمل‌ها بر مطالعه و بررسی با دخل و تصرف حداقلی در جهت تغییرات و رعایت اصالت مصالح، تکنولوژی، گونه‌شناسی و شرایط محیطی بنا در طی عملیات مرمت، تأکید دارند. در این منشورها استفاده از مصالح بادوام و سازگار با نمونه‌های اصلی به‌منظور مرمت، توصیه شده و مداخله‌ی بسیار در بنا، چه مصالح و چه ساختار، منع گردیده است. هم‌چنین ذکر شده است که کلیه مداخلات باید، در جهت استفاده از مصالح و تکنولوژی‌های جدیدتر و مناسب‌تر در آینده برگشت‌پذیر باشند.

هدف اصلی طرح مرمت برج ۳۲ بازگرداندن وضعیت آن به شرایط قبل از زلزله است. برای دستیابی به این هدف نواحی مختلفی از سازه تثبیت، تقویت و مرمت خواهند شد. هم‌چنین برخی از قسمت‌های از بین رفته به شکل و فرم اصلی بازسازی خواهند گردید. مراحل طرح مرمت برج در جدول (۱) ارائه شده است. مراحل ۲، ۴، ۹ و ۱۰ در ادامه شرح داده خواهند شد.

در ابعاد کوچک و بزرگ برای بررسی رفتار دیوارها و ساختمان‌های خشتی، و مطالعات دقیق ساختمان‌های خشتی آسیب‌دیده در زلزله‌ها بود [۱۰۱۲ و ۱۰۱۴]. اورامی و همکاران [۱۰۱۶] مروری کامل بر فعالیت‌های مؤسسه‌ی حفاظت گتی تا سال ۲۰۰۸ ارائه کرده‌اند. نوگوئز و ناوارو [۱۰۴۰] در سال ۲۰۰۵ چگونگی مرمت دیوارهای خشتی با شبکه‌هایی از مواد مصنوعی را با ساختن پنج دیوار به طول ۲/۳ m و ارتفاع ۲/۳ m، که دو عدد آنها از خشت‌های معمولی و سه عدد آنها از خشت‌های صنعتی ساخته شده بودند، تحت بار مرده و بار جانبی چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. دیوارهای با خشت‌های صنعتی از خود مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری نشان دادند، هرچند در مواردی دچار گسیختگی‌های اساسی شدند. پس از مقاوم‌سازی دیوارهای آسیب‌دیده با شبکه‌هایی از مواد مصنوعی که بر روی آنها پوشش ماسه و سیمان کشیده شده بود، مشخص شد که این روش مقاوم‌سازی در برابر بارهای جانبی روشی مناسب می‌باشد. در سال ۲۰۰۷ یامین و همکاران [۱۰۶۰] ۱۸ دیوار خشتی به طول ۲/۵ m، ارتفاع ۲ m و ضخامت ۰/۵-۰/۴ m را تحت ترکیب بارهای قائم و بارهای افقی چرخه‌ای وارد در بالای دیوار قرار دادند. دیوارها از جنس خشت یا چینه و به‌صورت تقویت نشده، تقویت شده با شبکه، و تقویت شده با چوب بودند. آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از تقویت می‌تواند تا حدودی رفتار لرزه‌ای دیوارها را از طریق ایجاد پیوستگی و محصورشدگی سازه‌ای بهبود بخشد و آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های خشتی را کاهش دهد. در سال ۲۰۱۳ فیگوئیردو و همکاران [۱۰۷۰] آزمایش‌هایی را بر روی یک دیوار خشتی تقویت نشده تحت بار افقی چرخه‌ای و سپس بر روی همان دیوار پس از مرمت توسط تزریق با فشار ملات آهک در داخل ترک‌ها و مقاوم‌سازی با شبکه‌ای از جنس مواد مصنوعی انجام دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که در وضعیت مرمت و تقویت شده، رفتار لرزه‌ای دیوار به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است. مطالعات علمی در مورد مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی پس از وقوع زلزله‌ی

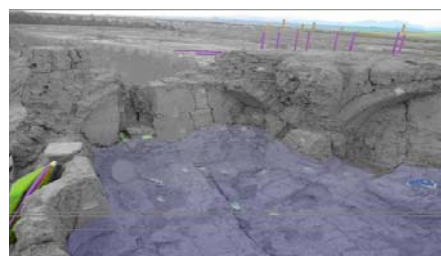
جدول ۱ مراحل طرح مرمت برج خشتی ۳۲

مرحله	شرح عملیات
۱	بررسی تاریخی بنا
۲	بررسی باستان‌شناسی بنا
۳	بررسی معماری و مستندات موجود در مورد شرایط فعلی بنا
۴	آسیب‌شناسی بنا
۵	تست‌های آزمایشگاهی برای تعیین خواص مکانیکی مصالح موجود
۶	بررسی تکنیک‌های بومی و محلی مرمت
۷	بررسی مواد در دسترس (مانند خاک، خشت، لایف درخت خرما و ...) به منظور ترمیم بخش‌های موجود و بازسازی نواحی تخریب شده بنا
۸	انتخاب روش و مصالح مرمت براساس منشورهای بین‌المللی و نتایج تست‌های آزمایشگاهی
۹	آنالیز سازه‌ای بنای اصلی به منظور ارزیابی میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن
۱۰	بررسی صحت نتایج تحلیل سازه و طرح مقاوم‌سازی سازه بنا
۱۱	تهیه نقشه‌های مرمت و مقاوم‌سازی قسمت‌های موجود بنا و بازسازی نواحی تخریب شده
۱۲	پایان بررسی‌ها و تحقیقات
۱۳	اجرای طرح مرمت، بازسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای بنا.

### باستان‌شناسی برج ۳۲

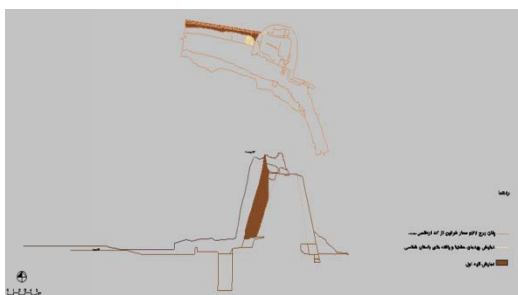
در جهت شناخت واحدهای معماری و لایه‌های تشکیل دهنده برج ۳۲ واقع در حصار شمالی ارگ بم، گمانه‌هایی حفر شده است.

**گمانه‌ی ۱: ناحیه‌ی بالای برج (کف اتاق نگهبانی).**  
در بالای برج اتاقی قرار دارد که در اثر زلزله پوشش گنبدی آن دچار ریزش گردیده است ولی دیوارهای اتاق با درصدی تخریب، باقی مانده‌اند (شکل ۵). این دیوارها از سه لایه تشکیل شده‌اند؛ خشت‌های  $۳۷ \times ۳۷ \times ۷$  سانتی‌متر در پایه‌ی دیوارها، چینه در میانه و خشت‌های  $۲۳ \times ۲۳ \times ۵$  سانتی‌متر در بالا و در پوشش‌های باقی‌مانده از سقف. این نتایج از گمانه‌ای به ابعاد  $۳ \times ۳ / ۵$  متر در داخل و در کف اتاقک بالای برج حاصل شده است.



شکل ۵ بخش‌های باقی‌مانده‌ی دیوارهای اتاق روی برج

**گمانه‌ی ۲: بالای دیوار شمالی.** با هدف مشخص ساختن لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی حصار (دیوار)، و نحوه‌ی اتصال آن با برج، ترانسه‌ای در ابعاد  $۱۲۰۰ \times ۶۰۰$  سانتی‌متر ایجاد شد. پس از پاک‌سازی اولیه و برداشتن سطحی‌ترین لایه که خاک باران خورده بود، ۴ لایه‌ی عمودی در کنار هم مشاهده شد. لایه‌ی اول، حصار (دیوار) اصلی و قدیمی است که در ابعاد  $۱۲۰۰ \times ۳۳۰$  سانتی‌متر و از خشت‌های  $۳۷ \times ۳۷ \times ۷$  سانتی‌متر تشکیل شده است. این لایه در قسمت وسط قرار گرفته است و دو نمای خارجی و داخلی آن طی کاوش به دست آمد. نمای بیرونی، دارای شیبی متوسط به طرف خارج است و نمای درونی با شیب بسیار کم تا پایین ادامه پیدا کرده است. بر روی دو نمای موجود، لایه‌ی کاهگل نیز مشاهده می‌شود (شکل ۶). لایه‌ی دوم، در قسمت شمال لایه‌ی اول قرار گرفته و از حصار قدیمی تا پای دیوار کنگره‌دار محدود می‌شود و در ابعاد  $۱۲۰۰ \times ۱۳۵$  سانتی‌متر است و از گل متراکم و فشرده تشکیل شده است (شکل ۷). لایه‌ی سوم، دیوارخشتی دارای کنگره است که در حال حاضر خارجی‌ترین قسمت حصار است. این دیوار دارای



شکل ۸ لایه سوم حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان‌شناسی

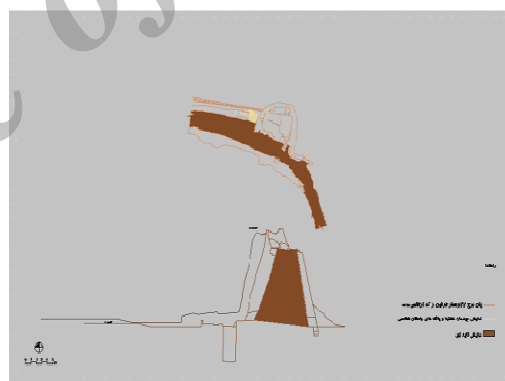


شکل ۹ لایه چهارم حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان‌شناسی

**گمانه‌ی ۳: محدوده‌ی غربی برج (بین پایه‌ی برج و حصار شمالی).** جهت مشخص شدن پایه‌ی برج، حصار و بستر اصلی آن، گمانه‌ای به ابعاد ۵×۳ متر ایجاد شد (شکل‌های (۱۰) و (۱۱)). پس از برداشت حدود ۰/۵ متر از سطح دامنه‌ی حصار (دیوار)، به پایه‌ی پوسته‌ی برج، که در واقع همان لایه‌ی سوم حصار است و به‌صورت یک لایه‌ی الحاقی، حول حصار قدیمی در قسمت خارج‌جی کشیده شده، دسترسی حاصل شد که از خشت‌های ۳۷×۳۷×۷ سانتی‌متر تشکیل شده است.

از گمانه‌ی کوچکی که در همین محدوده بر روی این پوسته، با هدف یافتن پایه‌ی حصار قدیمی و عرض پوسته‌ی موجود، ایجاد شد، مشخص گردید که حصار قدیمی در ارتفاع ۰/۷ متر بالاتر از پایه‌ی پوسته و یا لایه‌ی سوم حصار قرار گرفته و بر روی یک لایه‌ی ماسه‌ای ساخته شده است. عرض لایه‌ی سوم یا پوسته نیز ۲/۵ متر است. حصار از بالا و قسمت انتهایی حصار با شیب متوسطی به نزدیک پایه رسیده و سپس مقداری عریض‌تر شده و تا پایه ادامه پیدا کرده است.

شیب متوسطی است و به‌صورت پوسته‌ای در اطراف حصار اولیه کشیده شده است. این لایه از قسمت پایه تا ۵۰ سانتی‌متر بالاتر از بام حصار، از خشت‌های ۳۷×۳۷×۷ سانتی‌متر و سپس تا انتهای کنگره‌های موجود از خشت‌های ۲۳×۲۳×۵ سانتی‌متر تشکیل شده است و لایه‌ی کاهگلی نیز بر روی آن دیده می‌شود که در اثر عوامل جوی دچار فرسایش ناشی از نزولات جوی و وزش باد شده است (شکل ۸). لایه‌ی چهارم، در قسمت جنوب لایه‌ی اول قرار گرفته و عرض آن ۱۳۰ سانتی‌متر است و از چینه تشکیل شده است. در قسمت‌های میانه به پائین، علاوه بر چینه، خشت نیز به‌عنوان لایه‌ی دوم مشاهده می‌شود. این لایه به‌صورت نامنظم و بدون ترتیب و دقت خاصی ساخته شده است. لایه‌ی چهارم، لایه‌ی الحاقی‌ای است که از داخل ارگ به تناسب فضا و نیاز، به آن افزوده شده است (شکل ۹).



شکل ۶ لایه اول حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان‌شناسی



شکل ۷ لایه دوم حصار (دیوار) طبق بررسی‌های باستان‌شناسی

**گمانه‌ی ۵: قسمت داخلی و در پای حصار شمالی.**  
جهت به‌دست آوردن پایه‌ی حصار (دیوار) شمالی اولیه از داخل و تعیین پی آن، گمانه‌ای در محدوده‌ی داخلی ارگ، در پای حصار و برج (در داخل لایه‌ی چهارم، چینه و خشت الحاقی) ایجاد شد (شکل ۱۲).



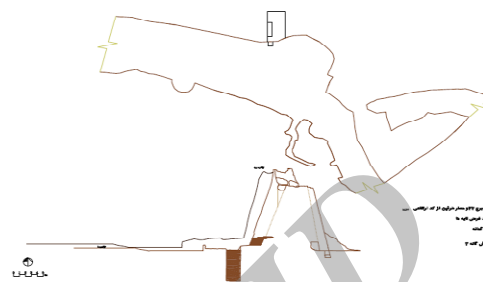
شکل ۱۲ گمانه‌ی ۵ در نمای داخلی برج و در پای حصار شمالی

این گمانه پس از برداشت ۱/۳ متر از لایه‌ی خشتی، به‌صورت افقی، به دیواری از جنس چینه رسید. این دیواره در امتداد نمای خشتی داخلی حصار قدیمی (لایه‌ی اول) است. بر روی لایه‌ی متشکل از چینه، آثار دودزدگی دیده می‌شود و لایه‌ی الحاقی خشتی در جلوی آن قرار گرفته‌است.

دیواره‌ی چینه‌ای در واقع پی حصار قدیمی (لایه‌ی اول) است و آثار دودزدگی بر روی آن نشان از استفاده به‌عنوان نمای داخلی حصار در یک دوره‌ی زمانی دارد.

**خلاصه‌ی فعالیت‌های باستان‌شناسی.** با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌ها در برج ۳۲، نتایج ذیل

در همین قسمت با هدف رسیدن به بستر اصلی و با فرضیه‌ی بستر سنگی، گمانه ادامه پیدا کرده و در ارتفاع ۷/۵ متر از ابتدای پایه برج به کف سنگی (ادامه‌ی صخره‌ی سنگی واقع در زیر بنای محدوده حاکم‌نشین) رسیده‌است.



شکل ۱۰ گمانه‌ی ۳ در محدوده‌ی غربی برج، بین پایه‌ی برج و حصار شمالی و بر روی دامنه‌ی کم‌ارتفاع آن‌ها

**گمانه‌ی ۴: بدنه‌ی برج.** جهت تکمیل مطالعات برج ۳۲ و با هدف کشف پایه‌ی برج (به‌شکل نیم‌دایره) و به‌دست آوردن حدود شیب برج قدیمی، دو گمانه در بدنه آن ایجاد گردید.

حفره‌ی شماره‌ی ۱ در میانه‌ی برج به‌صورت افقی ایجاد شد (شکل ۱۱) که پس از حدود ۲ متر دیواره‌ی منحنی برج همراه با لایه‌ی کاهگل مشاهده گردید. در ادامه‌ی جهت رسیدن به پایه‌ی برج، حفره‌ی شماره‌ی ۲ در دامنه‌ی حصار و مماس با برج ایجاد شد (شکل ۱۰) و پس از پیش‌روی به داخل و حذف خشت‌های لایه‌ی بیرونی، در حدود ۲/۵ متر، پایه‌ی برج نیز مشخص گردید.



شکل ۱۱ گمانه‌های ۳ و ۴ در نمای خارجی برج. گمانه‌ی ۳ سمت‌راست تصویر و در تقاطع دیوار و برج، حفره‌ی ۱ از گمانه‌ی ۴ در میانه‌ی تصویر و حفره‌ی ۲ از گمانه‌ی ۴ سمت چپ و در میانه‌ی بدنه برج می‌باشند

حاصل آمده‌اند:

- ۱- فرم نیم‌دایره‌ای برج از نمای خارجی.
- ۲- چیده‌مان نامنظم خشت‌های قسمت شمالی و هم‌ردیف بودن خشت‌های قسمت جنوبی ترانشه.
- ۳- وجود پوشش کاهگل در نمای لبه نیم‌دایره تا پایه‌ی برج.
- ۴- در وسط، لایه‌ای از گل متراکم و فشرده که از حصار اولیه تا پای دیوار کنگره‌دار ادامه دارد، دیوار خشتی کنگره‌دار، و دیوار الحاقی چینه‌ای که در محدوده‌ی جنوبی حصار اولیه قرار گرفته است.
- ۵- نمای خارجی حصار اولیه با پوشش کاهگل بوده و با شیب ملایمی تا پایه ادامه پیدا کرده است.
- ۶- دیوار خشتی دارای کنگره یا لایه‌ی سوم، در بخش خارجی حصار به‌عنوان یک لایه‌ی الحاقی با هدف مستحکم‌تر و عریض‌تر کردن آن، ساخته شده است. این لایه هر چه به پایه نزدیک‌تر می‌شود دارای شیب بیشتری می‌گردد و به ضخامت آن افزوده می‌شود.
- ۷- لایه‌ی دوم جهت پر کردن فضای بین حصار اولیه و دیوار خشتی کنگره‌دار ایجاد شده است.
- ۸- دامنه‌ی صخره‌ی سنگی که حاکم‌نشین بر روی آن ساخته شده، تا حصار شمالی و بالاخص برج ۳۲ ادامه پیدا کرده است.

### آسیب‌شناسی برج ۳۲

برج ۳۲ در گوشه‌ی شمال شرقی و در ابتدای شکستگی حصار پیرامونی ارگ بم قرار گرفته است (شکل ۱۴). این برج در اثر زلزله در نمای بیرونی دچار ترک‌های برشی برروی پوسته‌ی خارجی خود شده است. درحالی‌که در نمای داخلی این ترک‌ها مشاهده نمی‌شوند (شکل ۳) و فقط فرورینگی بخشی از مصالح اتاق فوقانی آن دیده می‌شود. اتاق نگهبانی بالای برج در زلزله، به‌غیر از قسمتی از آن، تخریب شده است (شکل ۵). دیوار شرقی بر خلاف دیوار شمالی دچار تخریب وسیعی شده است (شکل ۴). در عین حال برج مذکور سالم‌ترین برج در حصار پیرامونی ارگ پس از زلزله محسوب می‌گردد.



شکل ۱۳ فضای داخلی حفره‌ی ۱ از گمانه‌ی ۴؛ به ترک‌خوردگی ناحیه‌ی بالایی گمانه که تا هسته‌ی برج (در انتهای گمانه) ادامه دارد، توجه شود

- ۴- تشکیل برج از دو لایه‌ی شامل هسته برج که از پایه تا بالاترین سطح موجود ادامه دارد و پوسته‌ی الحاقی حول آن که با هدف مستحکم‌تر و بزرگ‌تر کردن برج ایجاد شده است (شکل ۱۳).
- ۵- جداشدگی پوسته و لایه‌ی الحاقی خارجی از هسته‌ی برج ناشی از زلزله (لغزش پوسته بر روی هسته‌ی برج).
- ۶- تشکیل حصار محدوده‌ی غربی برج از چهار لایه شامل دیوار خشتی با عرض ۳/۳ متر (حصار اولیه)



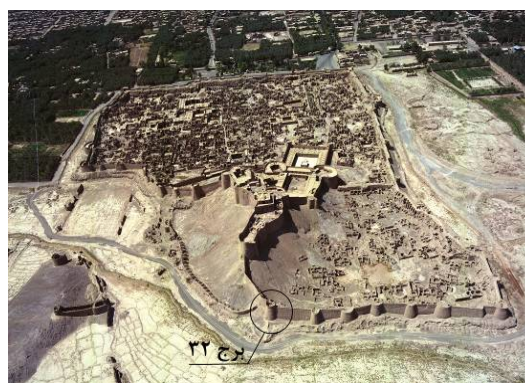
[۱۹]. با توجه به اطلاعات موجود، سعی شده است از دو شتاب‌نگاشت زلزله‌ی واقعی اتفاق افتاده در مناطق دیگر که تا حد امکان با شرایط تکنیکی و لرزه‌ای بم مطابقت دارند علاوه بر شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم استفاده شود. رکوردهای زلزله مورد استفاده به شرح ذیل است:

۱- مؤلفه‌ی شرقی - غربی رکورد زلزله‌ی پنجم دی ۱۳۸۲ بم - ایران به بزرگی ۶/۵ ریشتر (شکل ۱۵).

۲- مؤلفه‌ی طولی رکورد زلزله هفدهم فروردین ۱۳۵۶ ناغان به بزرگی ۶ ریشتر و ضریب مقیاس ۰/۸ (شکل ۱۶).

۳- مؤلفه‌ی شمالی - جنوبی رکورد زلزله هجدهم می ۱۹۴۰ السنترو به بزرگی ۷/۱ ریشتر و ضریب مقیاس ۱/۵ (شکل ۱۷).

جهت مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها براساس استاندارد ۲۸۰۰، شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده به مقدار حداکثر خود مقیاس شده‌اند. طیف پاسخ شتاب هر یک از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵٪ ساخته شده‌است. سپس طیف پاسخ در محدوده‌ی زمان‌های تناوب  $0.2T$  و  $1.5T$  با طیف طرح استاندارد که از حاصل ضرب مقادیر ضریب بازتاب ساختمان برای زمین نوع ۲ در پارامترهای نسبت شتاب مبنا ( $A=0.3$ ) پهنه با خطر نسبی زیاد بم) و ضریب اهمیت ساختمان ( $I=1/2$ ) ساختمان‌های با اهمیت زیاد، ساختمان‌هایی که خرابی آن‌ها سبب از دست رفتن ثروت ملی می‌گردد) با فرض نسبت میرایی ۵٪ به دست می‌آید مقایسه گردیده و ضریب مقیاس آن‌چنان تعیین شده که در این محدوده مقادیر طیف‌ها در هیچ حالت کم‌تر از  $1/4$  برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. ضریب مقیاس تعیین شده، در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده (به مقدار حداکثر خود) ضرب شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته‌است.



شکل ۱۴ عکس هوایی از ارگ تاریخی بم؛ موقعیت برج ۳۲ با دایره‌ای حول آن مشخص شده‌است

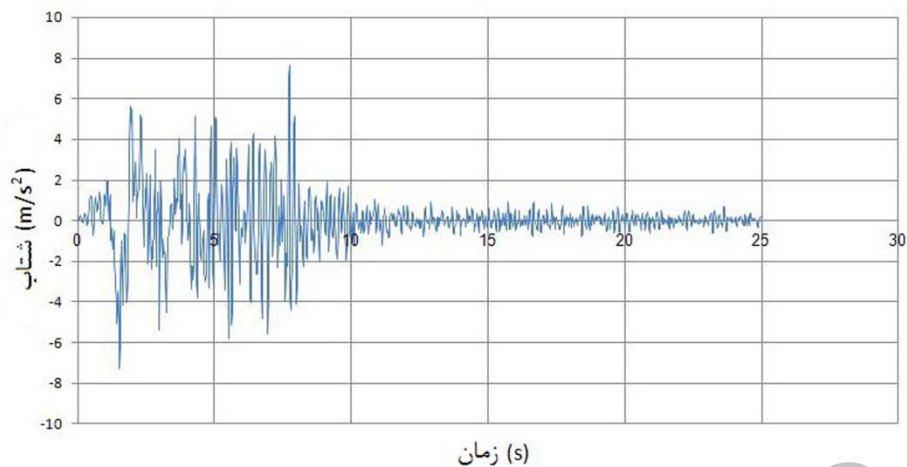
### روش آنالیز

جهت بررسی رفتار برج ۳۲ در مقابل زلزله، آنالیزهای دینامیکی غیرخطی به روش المان محدود توسط نرم افزار ANSYS Workbench (v:11) [17] بر روی مدل‌های سه بعدی سازه آن انجام شده‌است. هندسه و ابعاد المان‌ها پس از آنالیز حساسیت و انجام تعداد زیادی آنالیز بر روی سازه‌ی برج ۳۲ تحت رکورد زلزله‌ی بم انتخاب شد به طوری در آخرین مدل، آسیب‌های نشان داده شده بسیار نزدیک به آسیب‌های واقعی به دست آمد.

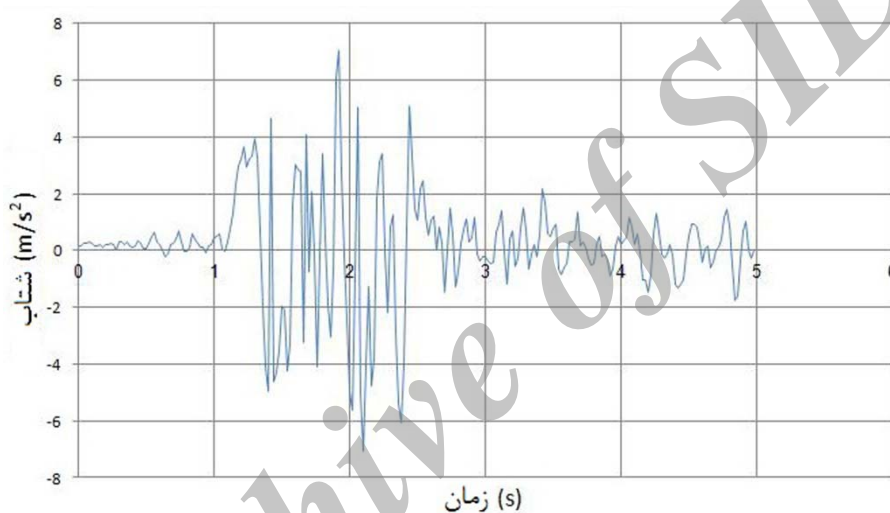
جهت بررسی وقوع شکست در سازه (ترک خوردگی و یا خردشدگی) مقادیر تنش در نواحی مختلف سازه در سرتاسر زمان زلزله با مقادیر مقاومت‌های مصالح که در جدول (۲) ذکر شده‌اند، مقایسه گردیده‌اند.

### بارگذاری

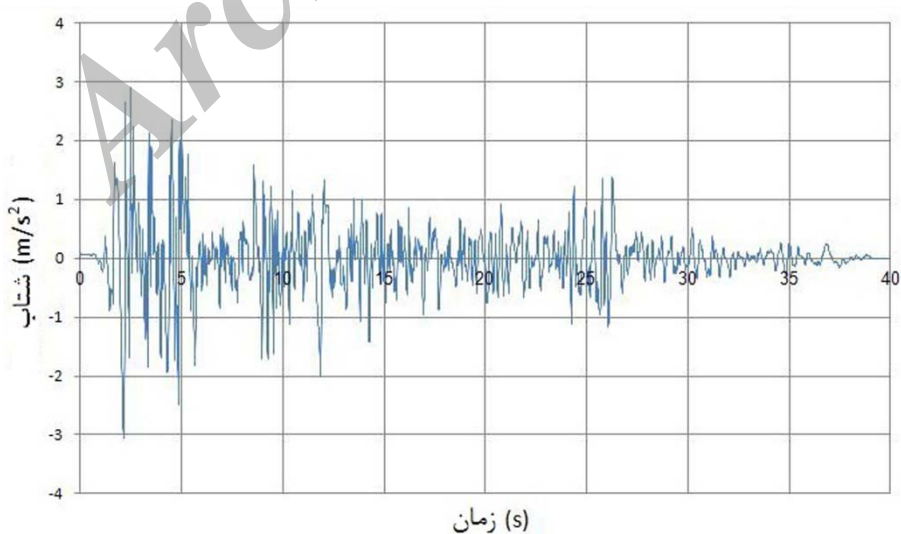
براساس استاندارد ۲۸۰۰ [۱۸]، از سه رکورد زلزله‌ی مقیاس شده، برای آنالیزهای دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی استفاده شده‌است و از نتیجه‌ی بحرانی‌تر در بررسی‌های سازه استفاده گردیده‌است. زمین منطقه‌ی مورد مطالعه طبق استاندارد ۲۸۰۰ از نوع ۲ می‌باشد



شکل ۱۵ رکورد زلزله‌ی ۱۳۸۲ بم (مؤلفه‌ی شرقی-غربی) [۱]



شکل ۱۶ رکورد اصلاح شده زلزله‌ی ۱۳۵۶ ناغان (ضریب اصلاح ۰/۸) [۱]



شکل ۱۷ رکورد اصلاح شده زلزله‌ی ۱۹۴۰ السنترو (مؤلفه‌ی شمالی-جنوبی و ضریب اصلاح ۱/۵) [۱]

### خصوصیات مصالح

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی خشت [۱، ۱۰] و [14,20,21]

۱۶۰۰	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )
۱۰۵	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۱۷	ضریب پواسون
۰/۳۶	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۰۳۶	مقاومت کششی (MPa)
۰/۴۵	مقاومت خردشدگی (MPa)
۰/۰۴۵	مقاومت ترک خوردگی (MPa)
۰/۲	ضریب اصطکاک بین دو سطح خشتی

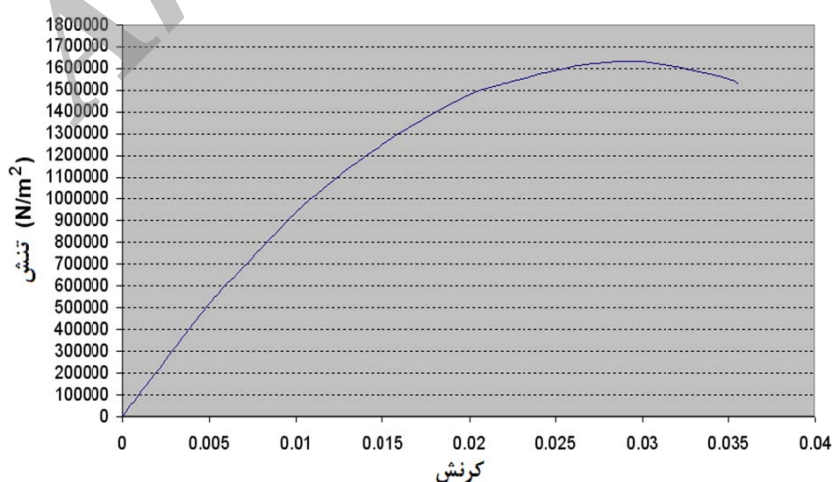
جدول ۳ خصوصیات دینامیکی به کار رفته در آنالیزها [۱]

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

نوع مصالح مورد استفاده در سازه‌ی برج از نوع خشت و گل و در برخی قسمت‌ها آمیخته با کاه می‌باشد. در طرح مرمت ترک‌ها و همین‌طور کنگره‌های برج از المان‌های FRP و شبکه‌های ژئوگرید بهره گرفته شده‌است. خصوصیات مکانیکی مصالح خشتی مشخص شده در جدول (۲)، براساس مطالعات جامع و نتایج آزمایشگاهی بر روی بلوک‌های خشتی ارگ بم [۱۰] حاصل شده‌اند. دیاگرام تنش- کرنش خشت حاصله در شکل (۱۸) از نتایج آزمایشگاه ارگ بم بوده که به دلیل عدم قرارگیری نقطه‌ی صفر در مرکز مختصات، بر اساس اصول مقاومت مصالح اصلاح گردیده‌است. مشخصات دینامیکی به کار رفته در آنالیزهای لرزه‌ای همین‌طور خصوصیات مکانیکی مصالح FRP و ژئوگرید به ترتیب در جداول (۳) و (۴) آورده شده‌اند.

جدول ۴ خصوصیات مکانیکی میلگردهای FRP و ژئوگرید [۱]

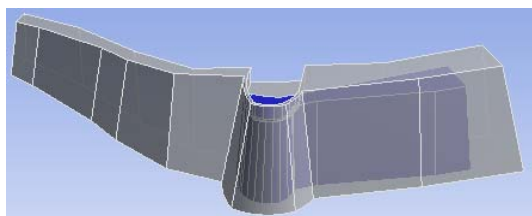
۱	مقاومت کششی (GPa)	میلگرد FRP به قطر 22mm
۴۰	مدول الاستیسیته (GPa)	
۵۵	مقاومت کششی الیاف ( $\text{kN/m}$ )	ژئوگرید GX 55
۶/۵	کرنش نظیر مقاومت کششی الیاف (%)	
۰/۵	ضریب کاهش مقاومت کششی	



شکل ۱۸ دیاگرام تنش- کرنش اصلاح شده خشت‌های قدیمی در ارگ بم [۱]

دیده می‌شود دیوار سمت چپ (دیوار شرقی) برج از بالا تا پایین با یک شکاف (درز انقطاع) به عرض ۰/۵ متر از قسمت انتهایی خود که به برج متصل شده است، جدا شده تا اثر عدم اتصال این دیوار ضعیف به برج در کاهش تنش‌ها و خسارات بررسی شود.

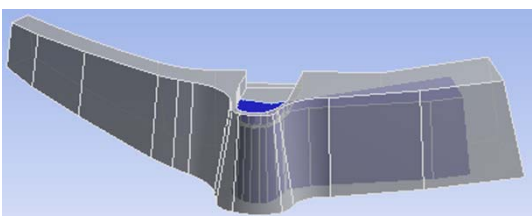
**مدل ۳.** این مدل شامل برج و دیوارهای دو طرف با اعمال تغییراتی در هندسه دیوارها جهت افزایش تدریجی ضخامت دیوارها در محل اتصال به برج می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲۱) دیده می‌شود دیوار سمت چپ (دیوار شرقی) برج در تصویر ضخیم‌تر شده و شکستگی‌ها و گوشه‌های تیز که باعث ایجاد تمرکز تنش می‌شوند حذف شده‌اند.



شکل ۱۹ وضعیت شماتیک برج قبل از زلزله با بخشی از دیوارهای کناری (مدل ۱)



شکل ۲۰ وضعیت شماتیک برج قبل از زلزله در حالت دیوار سمت چپ (شرقی) جدا شده توسط درز انقطاع با عرض ۰/۵ متر (مدل ۲)



شکل ۲۱ وضعیت شماتیک برج با اعمال تغییراتی در هندسه دیوار سمت چپ (شرقی) و در هندسه اتصال دیوارهای جانبی به برج (مدل ۳)

## مدل‌های بررسی شده

جهت بررسی رفتار دینامیکی و بررسی وضعیت تنش‌ها و همین‌طور موقعیت‌یابی خرابی‌های سازه‌ی برج از آنالیزهای دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. در آنالیز دینامیکی از سه شتاب‌نگاشت، زلزله‌های بم، ناغان و السترو که قبلاً به آن اشاره گردید، استفاده شده است. رفتار مصالح سازه نیز با معرفی دیاگرام تنش - کرنش غیرخطی (مطابق آنچه در مطالعات و آزمایشات مقاومت مصالح در آزمایشگاه سایت ارگ بم حاصل شده) تعریف گردیده است. به دلیل آن‌که سازه در قسمت برج و دیوار شمالی آن دارای هسته‌ای با عدم اتصال به پوسته‌ی خود می‌باشد نیاز به مدل‌سازی عملکرد اصطکاکی با در نظر گرفتن ضریب اصطکاکی مناسب برای آن بوده است.

مدل‌های مورد بررسی شامل ۳ حالت مختلف هستند که در ادامه معرفی خواهند شد. جهت بررسی واقع بینانه‌تر سازه، از لحاظ شرایط تکیه‌گاهی دو طرف و همین‌طور اثر وجود دیوارها (اندرکنش بین دیوارها و برج)، دو دیوار کناری برج هرکدام تنها به طول ۲۰ متر، یعنی در حدود نصف کل طول هر دیوار، مدل‌سازی شده‌اند. این طول بر اساس آنالیز حساسیت به دست آمده است.

**مدل ۱.** این مدل شامل وضعیت برج و دیوارهای دو طرف مطابق با وضعیت قبل از زلزله می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۹) دیده می‌شود دیوار سمت چپ برج (دیوار شرقی) دارای تغییر در ضخامت می‌باشد که در واقع به صورت یک نقطه ضعیف و با پتانسیل بالا در تخریب تحت تغییر شکل‌های جانبی به نظر می‌رسد.

**مدل ۲.** این مدل شامل برج و دیوارهای دو طرف مطابق با وضعیت قبل از زلزله ولی با جداسازی دیوار شرقی از برج در ناحیه‌ی تخریب شده (ناحیه‌ی کم‌ضخامت) می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲۰)

## نتایج آنالیزها

خلاصه‌ی نتایج حاصل شده از آنالیز مدل‌های سازه‌ای ۱، ۲ و ۳ تحت زلزله‌های بم، ناغان و السسترو در جداول (۵) تا (۷) آورده شده است. کانتورهای ضریب اطمینان در شکل‌های (۲۲) تا (۲۴) نشان داده شده‌اند که در آنها اعداد کم‌تر از ۱ به معنای خسارت دیدن سازه و اعداد بزرگ‌تر از ۱ به معنای سالم ماندن آن است. بر اساس شکل‌های (۲۲) تا (۲۴)، مدل ۱ (سازه‌ی اولیه بدون تغییر) دقیقاً همان خساراتی را که در زلزله‌ی بم به بنا وارد شده است، تجربه می‌کند. نتایج حاکی از آن است که ضعیف‌ترین ناحیه‌ی بنا محل

اتصال دیوار شرقی (دیوار سمت چپ در شکل‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۲۲)) می‌باشد، که باعث خرابی این دیوار شده است. عملکرد مدل ۳ (سازه با تغییرات در هندسه‌ی دیوار شرقی و اتصال دیوارهای جانبی به برج) نشان‌دهنده‌ی اثر بهتری برای بنا نبوده به صورتی که هنوز اتصال دیوار شرقی به برج دچار خسارت شده است. این در حالی است که جدایی دیوار شرقی از برج (مدل ۲) با یک درز انقطاع به عرض ۰/۵ متر در امتداد ارتفاع دیوار، باعث کاهش خرابی‌ها و خسارات به سازه می‌شود.

جدول ۵ نتایج آنالیز مدل‌های ۱ و ۲ تحت زلزله‌ی بم

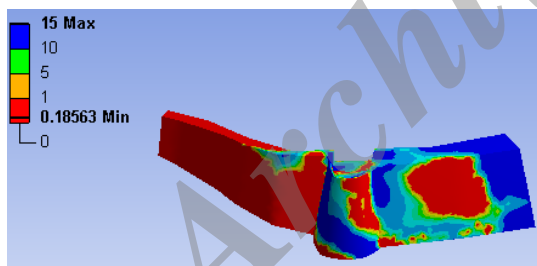
توضیحات	مدل ۲	مدل ۱	پارامتر مورد بررسی
به دلیل ضعف هندسی سازه، مدل ۱ قادر به تحمل زلزله نیست. خرابی دیوار شرقی در مدل ۱ باعث شده است تا آنالیز سازه در زمان ۱/۹۶ ثانیه متوقف شود.	کامل شده	کامل نشده	وضعیت آنالیز
جدایی دیوار شرقی از برج در مدل ۲ کمک کرده است تا سازه از پس نیروهای ناشی از زلزله برآید و کل زمان آنالیز را پشت سر گذارد.	۰/۰۰	۰/۰۰	زمان شروع آنالیز
	۲۵/۰۲	۱/۹۶	زمان پایان آنالیز (s)
در هر دو مدل، پیروید ارتعاشی تقریباً دو برابر شده است در واقع به دلیل ترک خوردگی و خردشدگی سختی سازه کاهش یافته است.	۰/۳۲	۰/۳۱	پیروید ارتعاشی سازه در شروع آنالیز (s)
	۰/۶۱	۰/۷۲	پیروید ارتعاشی سازه در پایان آنالیز (s)
ترک خوردگی در هر دو مدل ایجاد شده است.	۰/۲	۰/۰۸	تنش کششی حداکثر (MPa)
در مدل ۲، تنش فشاری موجود کم‌تر از مقاومت فشاری می‌باشد (جدول ۲)؛ بنابراین، خردشدگی در مدل ۲ به وجود نمی‌آید. به دلیل کامل نشدن آنالیز در مدل ۱ نمی‌توان در مورد شدت تنش فشاری مقایسه‌ای انجام داد.	۰/۲	۰/۲	تنش فشاری حداکثر (MPa)
تغییر شکل جانبی در راس سازه در مدل ۲ کم‌تر از حد مجاز شده است (یک درصد ارتفاع سازه، ۰/۱۵ متر) [۱۸]. به دلیل عدم تکمیل آنالیز در مدل ۱ بررسی تغییر شکل جانبی آن ممکن نیست.	۰/۱	۰/۰۵	تغییر شکل جانبی حداکثر (m)
کانتورهای ضریب اطمینان (شکل ۲۲)، نشان می‌دهند که مدل ۱ خسارات شدیدی متحمل شده است، در حالی که خسارت در مدل ۲ بسیار کم‌تر است. در واقع جدایی دیوار شرقی از برج، نقشی برجسته در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه داشته است. شدت خرابی‌ها در مدل ۱ بیان‌گر آن است که، دیوار شرقی (سمت چپ برج) سریعاً در زلزله تخریب شده و همین امر باعث عدم تداوم آنالیز لرزه‌ای سازه می‌شود.	آسیب‌پذیری کم (شکل ۲۲)	آسیب‌پذیری زیاد (شکل ۲۲)	وضعیت کلی سازه براساس کانتورهای ضریب اطمینان

جدول ۶ نتایج آنالیز مدل‌های ۱ و ۲ تحت زلزله ناغان

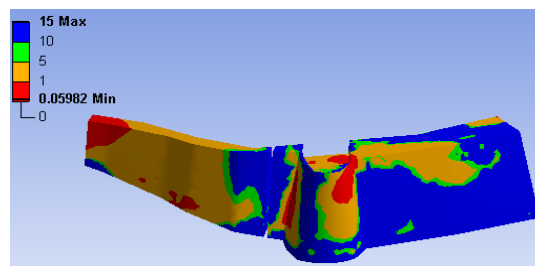
توضیحات	مدل ۲	مدل ۱	پارامتر مورد بررسی
اثر زلزله ناغان بر روی مدل‌ها به شدت زلزله‌ی بم نیست، بنابراین آنالیز در هر دو مدل کامل شده است.	کامل شده	کامل شده	وضعیت آنالیز
	۰/۰۰	۰/۰۰	زمان شروع آنالیز
	۵/۰۲	۵/۰۲	زمان پایان آنالیز (s)
پریود ارتعاشی در هر دو مدل تقریباً دو برابر شده، که بیان‌گر کاهش سختی سازه در اثر ترک‌خوردگی و خردشدگی است.	۰/۳۲	۰/۳۱	پریود ارتعاشی سازه در شروع آنالیز (s)
	۰/۶۱	۰/۵۹	پریود ارتعاشی سازه در پایان آنالیز (s)
ترک‌خوردگی در هر دو مدل ایجاد شده است.	۰/۲	۰/۱۸	تنش کششی حداکثر (MPa)
تنش فشاری موجود در سازه در هر دو مدل کم‌تر از مقاومت فشاری مصالح (جدول ۲) است، که در نتیجه آن خردشدگی در سازه محدود می‌باشد.	۰/۲۶	۰/۳۳	تنش فشاری حداکثر (MPa)
تغییر شکل جانبی در راس سازه هر دو مدل کم‌تر از حد مجاز شده است (یک درصد ارتفاع سازه، ۰/۱۵ متر) [۱۸].	۰/۰۶	۰/۰۵۳	تغییر شکل جانبی حداکثر (m)
کانتورهای ضریب اطمینان (شکل ۲۳)، نشان می‌دهند که دیوار شرقی (دیوار سمت چپ) برج در مدل ۲ تا حدودی متحمل خسارت می‌شود، ولی خسارت خاصی به برج و دیوار شمالی (دیوار سمت راست برج) وارد نشده است. شدت خرابی‌ها در مدل ۱ بیان‌گر آن است که دیوار شرقی (سمت چپ برج) سریعاً در زلزله تخریب شده و همین امر باعث عدم تداوم آنالیز لرزه‌ای سازه می‌شود. براساس کانتورهای ضریب اطمینان (شکل ۲۳)، مدل ۲ در زلزله ناغان دچار آسیب نشده است.	بدون آسیب (شکل ۲۳)	آسیب‌پذیری تقریباً کم (شکل ۲۳)	وضعیت کلی سازه بر اساس کانتورهای ضریب اطمینان

جدول ۷ نتایج آنالیز مدل‌های ۱ و ۲ تحت زلزله‌ی السسترو

توضیحات	مدل ۲	مدل ۱	پارامتر مورد بررسی
اثر زلزله‌ی السسترو بر روی مدل‌ها به شدت زلزله‌ی بم نیست، بنابراین آنالیز در هر دو مدل کامل شده‌است.	کامل شده	کامل شده	وضعیت آنالیز
	۰/۰۰	۰/۰۰	زمان شروع آنالیز
	۳۷/۰۶	۳۷/۰۶	زمان پایان آنالیز (s)
پریود ارتعاشی در هر دو مدل تقریباً دو برابر شده، که بیان‌گر کاهش سختی سازه در اثر ترک‌خوردگی و خوردشدگی است.	۰/۳۲	۰/۳۱	پریود ارتعاشی سازه در شروع آنالیز (s)
	۰/۶۱	۰/۵۹	پریود ارتعاشی سازه در پایان آنالیز (s)
ترک‌خوردگی در هر دو مدل ایجاد شده‌است.	۰/۳۱	۰/۳	تنش کششی حداکثر (MPa)
تنش فشاری موجود در سازه در هر دو مدل کم‌تر از مقاومت فشاری مصالح (جدول ۲) است، که در نتیجه‌ی آن خوردشدگی در سازه محدود می‌باشد.	۰/۳	۰/۳	تنش فشاری حداکثر (MPa)
تغییرشکل جانبی در راس سازه هر دو مدل کم‌تر از حد مجاز شده‌است (یک درصد ارتفاع سازه، ۰/۱۵ متر) [۱۸].	۰/۱	۰/۱	تغییرشکل جانبی حداکثر (m)
کانتورهای ضریب‌اطمینان (شکل ۲۴)، نشان می‌دهند که برج و دیوار های دو سمت آن در مدل ۱، در برخی از نواحی بالایی آن‌ها دچار خسارت شده‌اند؛ در مقابل، خسارت در مدل ۲، در ناحیه‌ی پایینی برج و برخی از نواحی بالایی دیوار سمت‌راست برج (دیوار شمالی) رخ داده‌است. شدت خرابی‌ها در زلزله‌ی السسترو کمتر از زلزله‌ی بم بوده است.	آسیب‌پذیری کم (شکل ۲۴)	آسیب‌پذیری کم (شکل ۲۴)	وضعیت کلی سازه بر اساس کانتورهای ضریب‌اطمینان

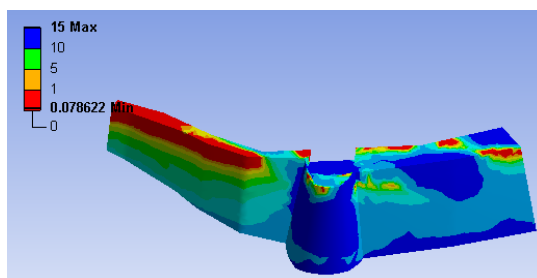


(الف)

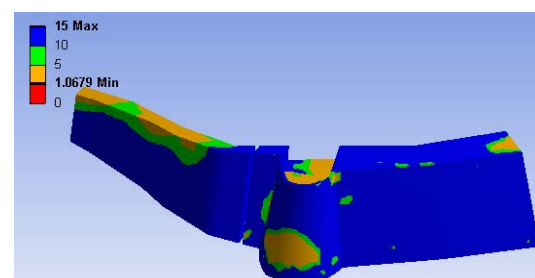


(ب)

شکل ۲۲ کانتورهای ضریب‌اطمینان سازه در زلزله‌ی بم: (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲

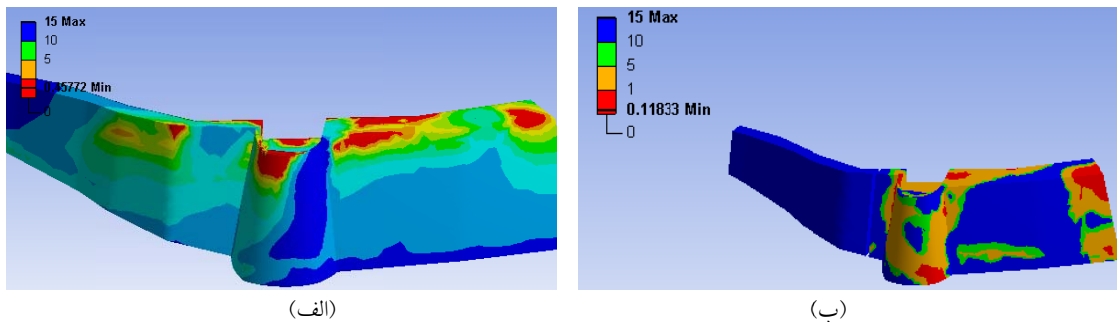


(الف)

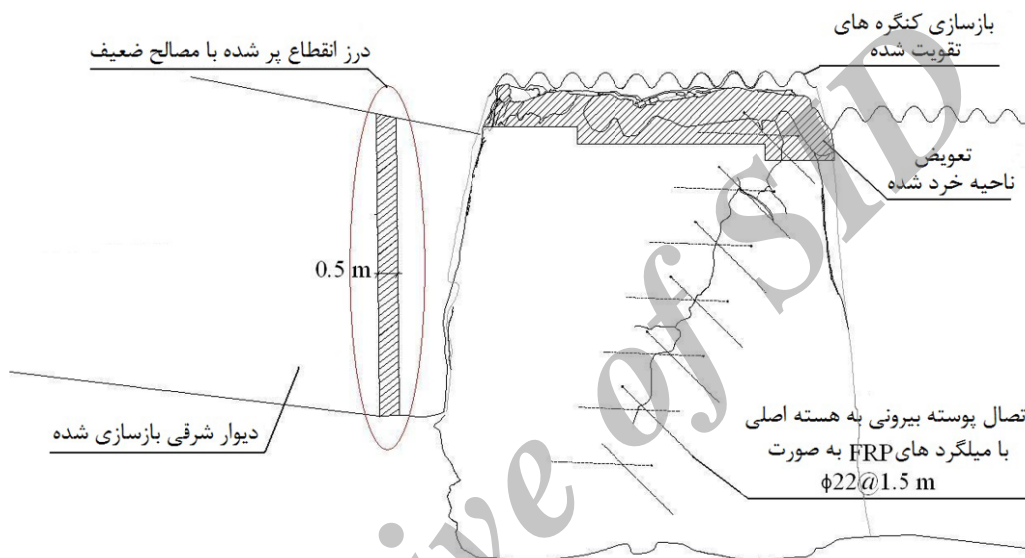


(ب)

شکل ۲۳ کانتورهای ضریب‌اطمینان سازه در زلزله‌ی ناغان: (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲



شکل ۲۴ کانتورهای ضریب اطمینان سازه در زلزله‌ی السترو: الف) مدل ۱، ب) مدل ۲



شکل ۲۵ طرح مرمت برج ۳۲ و دیوار شرقی آن

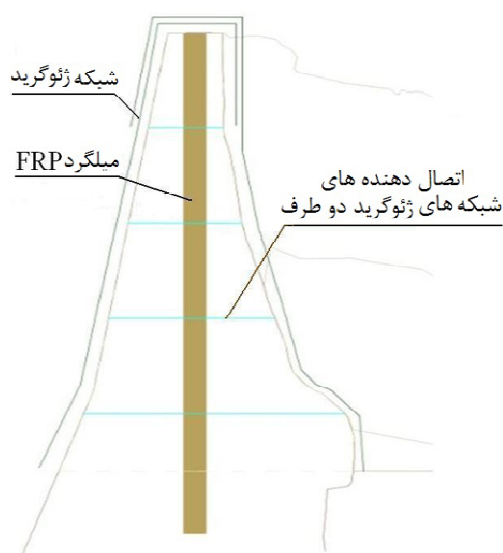
### طرح مرمت

**بازسازی دیوار شرقی و درز انقطاع.** دیوار تخریب شده‌ی سمت شرقی برج باید توسط آجرهای خشتی بازسازی شود. جهت جلوگیری از وقوع خسارت در زلزله‌های آتی، باید این دیوار توسط یک درز انقطاع به عرض ۰/۵ متر در امتداد ارتفاع دیوار و به فاصله‌ی ۵ متر از برج، جداسازی شود (شکل ۲۵). این درز باید با مصالح ضعیف مانند رس متراکم شده پر شود تا دیوار شرقی در زلزله به راحتی و بدون ایجاد سختی، از برج جدا شود و عملکرد مجزا داشته باشد.

**مرمت لایه‌ی خارجی برج.** خشت‌های خرد شده در لایه‌ی بیرونی برج باید حذف و توسط آجرهای خشتی و ملات گل مشابه جایگزین شوند. ترک خوردگی روی این لایه نیز باید توسط میلگردهای FRP (به قطر ۲۲ میلی‌متر) مطابق آنچه در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود دوخته شوند. این میلگردها باید به طول حداقل ۱/۵ متر در بدنه برج به صورت مورب کاشته شوند (توسط سوراخ‌کاری با مته‌ی مخصوص و سپس تزریق ملات مناسب و سازگار با مصالح سازه به داخل سوراخ‌ها و در نهایت جای‌گذاری میلگردهای FRP)، تا میلگرد به‌طور کامل دو طرف لایه‌ی ترک‌خورده‌ی خارجی



آنالیزهای سازه‌ای نشان دهنده‌ی آن بوده است که چوب با ابعاد کوچک (به‌طوری که قابلیت جاگذاری بدون تأثیر بر اندازه کنگره‌ها را داشته باشد) مقاومت و سختی لازم را جهت عملکرد مناسب کنگره‌های سازه فراهم نمی‌سازد.



شکل ۲۶ تقویت کنگره‌ها با میلگردهای FRP و الیاف ژئوگرید

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته در پروژه مرمت برج ۳۲ در ارگ بم به شرح زیر است:

۱- سازه‌ی برج را نباید دقیقاً به صورت وضعیت قبل از زلزله مرمت نمود، زیرا همان محل‌های آسیب‌دیده‌ی فعلی مجدداً دچار آسیب و تخریب خواهد شد. زمان وقوع تخریب ۱/۹۶ ثانیه بعد از وقوع زلزله‌ای مشابه زلزله‌ی بم می‌باشد.

۲- ضعیف‌ترین ناحیه‌ی سازه‌ی محل اتصال دیوار شرقی به برج ۳۲ می‌باشد، که باعث خرابی این دیوار شده است. حتی با تغییر در هندسه‌ی ناحیه‌ی اتصال نیز نمی‌توان از تمرکز تنش و خرابی در این ناحیه جلوگیری کرد.

۳- ایجاد یک درز انقطاع به عرض ۰/۵ متر در کل ارتفاع دیوار شرقی و به فاصله‌ی ۵ متری از برج

(به ضخامت ۱/۵ متر) را به هم وصل کند. ملات مورد استفاده برای ایجاد گیرایی بین میلگردهای FRP و خشت دارای پایه‌ی خاک و آهک با ترکیب مخصوص می‌باشد که قبلاً در پروژه‌ی دیگری در ارگ بم طراحی شده و به دست آمده است [۱۰]. مؤثر بودن استفاده از میلگردهای FRP و مقادیر طول‌های لازم برای گیرایی آنها نیز قبلاً در چند پروژه‌ی دیگر در ارگ بم به اثبات رسیده است [21 و ۱۰، ۱].

**بازسازی و تقویت کنگره‌ها.** اکثر کنگره‌های روی برج و باروهای ارگ بم به دلیل ضعف مصالح خشت در خمشی ناشی از تغییر شکل‌های جانبی و عدم اتصال مناسب به بدنه برج‌ها و دیوارها، در زلزله تخریب شده‌اند. از این رو کنگره‌های تخریب‌شده برج ۳۲ و دیوار شرقی آن باید بازسازی و تقویت شوند. این تقویت با جاگذاری و تعبیه یک میلگرد FRP به صورت عمودی (به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۱/۸ متر) در میانه‌ی هر کنگره انجام می‌شود. سپس روی خشت‌های کنگره یک لایه ژئوگرید (در دو طرف هر کنگره) مطابق شکل (۲۶) قرار گرفته و توسط اتصال دهنده‌های مناسب در میانه هر کنگره این مش بندی دوطرفه به هم وصل می‌شود تا درگیری کافی بین ژئوگرید و خشت جهت عملکرد توام در خمشی به وجود آید. جهت حفظ اصالت منظر، برای ناسازی یک لایه کاهگل کنگره‌ها را به صورت کامل پوشش می‌دهد.

استفاده از مصالح غیرطبیعی مانند FRP و ژئوگرید به جای چوب یا الیاف‌های طبیعی ساخته شده از درخت خرما و یا مصالح مشابه، در طرح تقویت و مرمت بنا به دلیل آن است که از پوسیدگی و خوردگی و در نتیجه نابودی المان‌های تقویت در اثر عوامل جوی یا موربانه جلوگیری شود. از طرف دیگر

شده روی برج و همین‌طور دیوار شرقی با میلگردهای FRP (جهت افزایش سختی و اتصال به بدنه برج یا دیوار) و الیاف ژئوگرید (جهت افزایش قابلیت خمش پذیری) تقویت و بازسازی خواهند شد.

### قدردانی

این کار با حمایت مالی حاصل از قرارداد شماره ۸۳/۹۴۹ مورخ ۱۳۸۴/۲/۳ بین نویسنده اول (عضو هیئت علمی دانشگاه اصفهان به‌عنوان موسسه‌ی پژوهشی) و پروژه‌ی نجات بخشی میراث فرهنگی بم (سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور به‌عنوان کارفرما) با موضوع پروژه‌ی مطالعه و آسیب‌شناسی دیوار شمالی و ارائه‌ی طرح مرمت برج ۳۲ انجام شده‌است.

می‌تواند رفتار لرزه‌ای سازه را به میزان زیادی بهبود بخشد. این درز با مصالحی ضعیف پر شده و سپس نواحی تخریب‌شده دیوار شرقی بازسازی خواهند شد. در این حالت، در اثر وقوع زلزله‌ای شبیه به زلزله‌ی بم حداکثر تنش‌های فشاری ایجاد شده برابر ۵۶ درصد مقاومت تنش فشاری مصالح است ولی در برخی از قسمت‌ها تنش‌های کششی از مقاومت کششی مصالح تجاوز می‌کنند و باعث ایجاد خسارات جزئی می‌شوند که به‌سادگی قابل مرمت خواهد بود.

۴- به‌منظور مرمت برج ۳۲، خشت‌های خرد شده روی جداره‌ی بیرونی برج باید حذف و جهت جایگزینی از آجر و ملات خشتی سازگار با بنا استفاده شود. قسمت‌های ترک‌خورده روی این جداره نیز با میلگردهای FRP (که پوسته‌ی برج را به‌هسته آن وصل می‌کنند) دوخته می‌شوند. کنگره‌های تخریب

### مراجع

- ۱- حجازی، مهرداد، "پروژه مطالعه و آسیب‌شناسی دیوار شمالی و ارائه طرح مرمت برج ۳۲"، گزارش نهایی، دانشگاه اصفهان و سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور، اصفهان و بم، (۱۳۸۹).
2. Hejazi, M., Mokhtari, E., Tehrani, F., Shirazi, B. and Khatooni, N., "Preliminary structural studies of the adobe tower No. 32 of the Bam citadel", *Proceedings of the 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage (Terra2008)*, Bamako, (2008).
3. Vargas, J., Blondet, M., Ginocchio, F. and García, G., "35 Años de investigaciones en sismo adobe: la tierra armada", *International Conference SismoAdobe 2005: Architecture, Construction and Conservation of Earthen Buildings in Seismic Areas*, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, (2005).
4. Leroy Tolles, E., Kimbro, E. E., Webster, F. A. and Ginell, W. S., "Seismic stabilization of historic adobe structures: final report of the Getty Seismic Adobe Project", *J. Paul Getty Trust*, Los Angeles, CA, (2000).
5. Leroy Tolles, E., Kimbro, E. E. and Ginell, W. S., "Planning and engineering guidelines for the retrofitting of historic adobe structures", *J. Paul Getty Trust*, Los Angeles, CA, (2002).

6. Avrami, E., Guillaud, H. and Hardy, M., "Terra literature review: an overview of research in earthen architecture conservation", *J. Paul Getty Trust*, Los Angeles, CA (2008).
7. Noguez, R. and Navarro, S., "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*, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, (2005).
8. Yamin, L., Phillips, C., Reyes, J., Rivero, S. and Ruiz, D., "Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada", *Revista de Estudios sobre Patrimonio, Journal of Cultural Heritage Studies*, ISSN 1657-9763, (2007).
9. Figueiredo, A., Varum, H., Costa, A., Silveira, D. and Oliveira, C., "Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall," *Materials and Structures*, Vol. 46 (1-2), pp. 203-219, (2013).
- ۱۰- مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک، "استحکام بخشی و دوخت و دوز سازه های خشتی ارگ بم"، گزارش های شماره ۱ تا ۳، تهران، (۱۳۸۵).
- ۱۱- حجازی، مهرداد، "مرمت و بازسازی یک حجره خشتی در بازار ارگ بم"، گزارش نهایی، دانشگاه اصفهان و سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری کشور، اصفهان و بم، (۱۳۸۹).
12. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Architecture", WIT Press, Southampton and Boston, (2014).
13. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Conservation", WIT Press, Southampton and Boston, (2014).
14. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Structure", WIT Press, Southampton and Boston, (2014).
15. ICOMOS, "International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (the Venice Charter 1964)", *International Council on Monuments and Sites (ICOMOS)*, Paris, (1964).
16. ICOMOS, "Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage (the Barcelona Charter 2005)", *International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) – International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage (ISCARSAH)*, Paris, (2005).
17. Zecher, J. and Dadkhah, F., "ANSYS Workbench Software Tutorial with Multimedia CD Release 11", Schroff Development Corporation, New York, (2008).
- ۱۸- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، "آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰"، ویرایش سوم، تهران، (۱۳۸۴).
- ۱۹- زارع، مهدی، "گزارش مقدماتی شناسایی مناطق زلزله بم"، سایت اینترنتی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

20. Vargas, J., Blondet, M. and Tarque, N., "Summary of building codes for earthen buildings in seismic areas: the Peruvian experience", *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, (2006).
21. Hejazi, M., "Historical Buildings of Iran: their Architecture and Structure", *Computational Mechanics Publications (WIT Press)*, Southampton and Boston, (1997).

Archive of SID