



Tabriz Islamic Art University  
1999

DOI: 10.29252/jra.3.2.81

URL: <http://jra-tabriziau.ir/>



Original Paper

## Structural and Physical Characteristics of the Adobe Bricks Used at the World Heritage Site of Arg-e Bam



Behnam Pedram<sup>\*1</sup>, Afshin Ebrahimi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Restoration of Historic Monuments and Sites, Art University of Isfahan, IRAN

<sup>2</sup>Ph.D Candidate, Conservation of Historic Properties, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, IRAN

Received: 23/09/2017

Accepted: 16/12/2017

### Abstract

Earthquake in 26<sup>th</sup> of December 2003 devastated the city of Bam and its magnificent Arg [citadel] and turned it to ruins. The Arg was surviving for centuries in this location. Some time it was more inhabited and once abandoned. During the past decades the Arg gradually becomes well known and it finds a general popularity over the past decade since the Iranian society recognizes it thanks to the efforts of the erudite scholars. This comprehensive recognition especially in the field of the materials is more important for the interventions since it supports any correct and successful conservation measure. Eventually, the structure of the Arg has been composed of several architectural layers constructed over each other. A considerable share of these structures includes repairs and infill constructions created upon the base of archaeological layers over the centuries. However, the recent researches discovered several structural weaknesses in most of the adobes used in Arg-e Bam. Nevertheless, the huge adobes which have been used in the surrounding wall, some parts of the governors sector, and a few significant buildings in the public sector, have a considerable quality and more attention has been paid in their production. Occasionally, weak architectural composition has intensified the structural weakness of the adobes. Accordingly, usage of the same adobe composition with the similar technique in restoration will follow an understandable concern and it sounds a critical measure. Neglecting this important element will direct the Arg in to the similar harsh experience of the past. According to the experiences concerning the structural behavior of the materials used in the Bam citadel, it is certain that any restoration and conservation measure by the same material would not result in any success. If no improvement is conducted on the weaknesses of such a fragile material, then the restoration exercises will encounter major challenges. Having referred to the results of the researches performed of the historical adobes of the Bam citadel, the importance and necessity of such improvement will become more apparent. Arg-e Bam has been frequently invaded the armies and tribes during its long life and the inhabitants had a very limited time for fixing the damaged parts. Consequently, adequate attention has not been paid on the quality of some of the adobes. This research with a functional approach is looking for recognition of the structural properties of the adobes used in the site as well as their strengths and weaknesses. In the frame of inductive reasoning (looking from detail to the whole), based on the experimental system with a compound method (library, laboratory, site investigations), this research tries to respond to the main question that is quiddity of the factors affecting the structure and the material behavior under the tensions as well as improvement and resolving the known weaknesses. Thus, the results of the researches concerning the structural characters of the adobes of the Bam citadel will help us in achieving the materials without or at least with minimum weaknesses comparing to the prior adobes in order to be used for the more

\* Corresponding author: [b.pedram@au.ac.ir](mailto:b.pedram@au.ac.ir)

reliable restorations. One may even think about production of the new adobes with boosted mechanical behavior. According to our knowledge about the condition of the earthen materials of the Bam citadel, it is possible to improve the characteristics of the new adobes and earthen mortars for the restoration measures by innovations in the production process. This is actually the hypothesis of the research.

**Keywords:** Archaeometry, Arg-e Bam, Earthen Architecture, Typology, Characterization.





CrossMark

## بررسی خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خشت‌های به‌کاررفته

### در محوطه میراث جهانی ارگ بم

بهنام پدram<sup>۱\*</sup>، افشین ابراهیمی<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه حفاظت و مرمت آثار، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲. دانشجوی دوره دکتری مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱

#### چکیده

ارگ تاریخی بم در شهرستان بم، استان کرمان، در پی قرن‌ها، روزگاری آبادتر و زنده‌تر و روزگاری متروک بر پای خود ایستاده بود که در ۵ دی‌ماه ۱۳۸۲ زلزله آن را به ویرانه‌ای تبدیل کرد. در چند دهه‌ی اخیر و به‌خصوص در دهه کنونی ارگ بم محبوبیت عمومی در جامعه ایرانی یافته است. این شناخت از آن جهت حائز اهمیت است که بدون مطالعات همه‌جانبه به‌ویژه در حوزه مواد و مصالح، کمتر می‌توان به مرمت موفق و اصولی موضع در دست تعمیر نائل گردید. ارگ بم به لحاظ کالبدی از توده‌های معماری انباشته بر روی هم تشکیل شده است. بخش قابل توجهی از این توده‌ها، الحاقات و پوسته‌های تعمیراتی است که در طی قرون متمادی بر شالوده لایه‌های باستانی فرسوده شکل گرفته‌اند. مطالعات اخیر نشان از چندین ضعف ساختمانی عمده در کالبد غالب خشت‌های به‌کاررفته در محوطه ارگ بم دارد. استفاده مجدد از چنین خشت‌هایی با همان شیوه تولید و کاربرد در مرمت‌های پیش‌رو، با تردید و نگرانی قابل‌درکی همراه است و اقدامی چالش‌برانگیز می‌نماید که بی‌توجهی به آن، ارگ را مجدداً در مسیر تجربه تلخ گذشته قرار خواهد داد. این حقیقت که ارگ بم در طول دوره حیات خود همواره و به‌دفعات مورد حمله و غارت قبایل مهاجم و لشکرکشی‌ها قرار داشته و لاجرم فرصت اندکی برای ترمیم نواحی آسیب‌دیده در اختیار ساکنان قلعه بوده است، طبیعتاً مانع می‌گردیده که توجه کافی به کیفیت ساخت پاره‌ای از خشت‌ها صورت گیرد. این تحقیق با رویکرد کاربردی به دنبال شناخت ویژگی‌های ساختمانی خشت‌های به‌کاررفته در محوطه و نقاط ضعف و قوت آن‌هاست و می‌کوشد در قالب استدلال استقرائی (نگاه از جزء به کل) بر پایه روش‌های تجربی و ترکیبی (فیزیکی- مکانیکی و شیمیایی) پاسخگوی سؤال اصلی یعنی چستی عوامل مؤثر در شکل‌دهی به ساختار و بروز تنش‌های رفتاری مصالح و چگونگی رفع یا تعدیل معایب شناخته شده باشد.

**واژگان کلیدی:** باستان‌سنجی، ارگ بم، معماری خشت و گلی، گونه‌شناسی، ساختارشناسی.

\* مسئول مکاتبات: اصفهان، خیابان حکیم نظامی، چهارراه خاقانی، دانشگاه هنر اصفهان، صندوق پستی ۱۷۴۴.

پست الکترونیکی: [b.pedram@au.ac.ir](mailto:b.pedram@au.ac.ir)

© حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ‌شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

## ۱. مقدمه

جامع‌نگری، دوراندیشی و رعایت اصول توسعه پایدار، مفاهیمی هستند که همواره در طراحی و اجرای پروژه‌های بزرگ مدنظر قرار داشته‌اند و چنین نیست که اخیراً به ذهن بشر خطور کرده باشند، سیاستی که قطعاً سازندگان ارگ بم نیز از آن پیروی کرده‌اند. تأثیر مجموعه این عوامل را می‌توان در مکان‌یابی، شکل معماری و انتخاب مصالح مورد مصرف در ارگ بم مشاهده کرد. برای ساخت مجموعه بناهای این محوطه تاریخی ۱۹ هکتاری، امتیازات مساعد محیطی کاملاً به خدمت گرفته شده‌اند. قرار گرفتن اصلی‌ترین بخش ارگ بر بلندترین نقطه ارتفاعی منطقه و بر فراز صخره‌ای طبیعی، بارزترین نمونه این دوراندیشی است. در سواحل رودی فصلی که در بخش شمالی ارگ جاری است، ذخایر کافی خاک و آب موردنیاز برای تولید خشت و ملات در اختیار بوده است، به‌گونه‌ای که امروزه نیز چنین است. این امتیازات و پاره‌ای ویژگی‌های دیگر البته مانع از آن نگردید که ارگ در برابر زلزله مهیب سال ۱۳۸۲ ایستادگی کند. تأثیرات زمین‌لرزه بر میراث مصنوع بم از جمله ارگ نشان می‌دهد که جدا از ویژگی‌های عمومی زلزله، هم کیفیت مهندسی ساخت‌وساز و هم کیفیت مصالح ساختمانی از عوامل اصلی بروز خسارت بوده‌اند. این موضوع به‌ویژه در توسعه فناوری معماری خشتی و گلی برای استفاده آتی در شهر بم اهمیت فوق‌العاده می‌یابد [1]. در ارتباط با مصالح، عموم خشت‌هایی که تا پیش از زلزله در محوطه ارگ بم مورد استفاده قرار گرفته‌اند، کم‌وبیش ضعف‌های عمده‌ای از خود نشان داده‌اند و تنها با وقوع چنین زمین‌لرزه‌ای امکان داشت این ضعف‌ها تا بدین اندازه ملموس و قابل تشخیص گردند. دررفتگی، شکستگی، پاشیدگی، سنگینی و پوکی مهم‌ترین معایبی هستند، که خشت‌های محوطه را درگیر نموده‌اند. پژوهش‌هایی که تاکنون به‌منظور شناخت خصوصیات ساختمانی خشت‌ها و عیب و ایرادات نهفته در آن‌ها انجام شده، همه‌ی اطلاعات لازم برای رسیدن به یک راه چاره مناسب که آسیب‌های ناشی از وقوع چنین بلایایی را به حداقل ممکن برساند، در اختیار قرار نمی‌دهند. این مطالعات چنانکه در ادامه (پیشینه‌ی تحقیق) می‌بینیم، غالباً با رویکرد شناسایی و

اندازه‌گیری اجزاء و عناصر خشت‌ها انجام گرفته‌اند تا ارزیابی و سنجش خصوصیات رفتاری آن‌ها.

## ۲. پیشینه و اهداف تحقیق

مطالعات پیشین ارگ بم، مربوط به سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۷، به فرض اطمینان از تاریخی بودن نمونه‌های موردبررسی، هرچند اطلاعات فناورانه‌ی مفیدی در اختیار قرار می‌دهند، لیکن پاسخگوی همه پرسش‌های مرتبط با ساختارشناسی خشت‌های ارگ بم نیستند. دلیل آن نیز نقصان در انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خشت‌ها و عدم ظرفیت بهره‌مندی از نتایج آزمایشگاهی در راستای تولید انبوه مصالح ارتقاءیافته و گذار از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس میدانی است. به همین خاطر در پژوهش حاضر بر انجام آزمایش‌هایی تأکید شده است که در گذشته به آن‌ها پرداخته نشده و یا کمتر موردتوجه قرار گرفته‌اند. تکرار برخی از آزمایش‌ها نیز به‌واسطه اهمیت و نقش پررنگشان در تعیین ویژگی‌های کالبدی چنین مصالحی اجتناب‌ناپذیر نشان می‌دهد. باید به این نکته نیز اشاره داشت که مطالعات گذشته به دلیل یکسان نبودن آزمایش‌های انجام‌گرفته، امکان مقایسه مطلوبی از خصوصیات ساختمانی خشت‌های محوطه را فراهم نمی‌سازند. بنابراین، ضرورت ایجاد می‌کند جهت حفظ آمادگی در برابر خطر و کاهش اثر سوانح در صورت بروز مجدد این‌گونه بلایای طبیعی و ایضاً پرهیز از تکرار تجربه تلخ گذشته در به‌کارگیری ساده‌انگارانه‌ی مصالح، شناخت درخوری نسبت به خصوصیات ماکروسکوپی و میکروسکوپی خشت‌های به‌کاررفته در محوطه، به ترتیب با انجام مطالعات گونه‌شناسی و فن‌شناسی حاصل گردد. مطالعه گونه‌شناسی که پیش‌تر جایی در فرایند شناخت خشت‌های ارگ بم نداشته، اکنون اعتبار بیشتری به نتایج تحقیق داده است. با نگاهی به ارگ بم درمی‌یابیم عمده تخریب‌ها در قسمت‌هایی اتفاق افتاده که در ادوار گذشته بیشترین مرمت‌ها در آن نواحی انجام‌گرفته و شدیدترین آسیب‌ها به خشت‌هایی وارد شده که در فرایند ساختشان ملاحظه‌ای صورت نگرفته است. با این توصیف، پرسشی که مطرح می‌شود این است که چه عواملی در شکل‌دهی

گیاهی، انسانی و ظروف سلادن، آبی و سفید و نقاشی زیر لعاب به دست آمده است. تحلیل کلی نمونه‌ها نشان می‌دهد که ارگ در دوران اسلامی تا سده‌ی ۶ هجری از اقتصاد شکوفایی برخوردار بوده است و اوج رونق اقتصادی آن مربوط به قرون ۳ تا ۶ هجری و نیز دوره‌ی صفویه است. این شکوه یک‌باره در اواخر قرن ۶ هجری که هم‌زمان با حمله ترکان غز نیز هست، از دست می‌رود اما شهر به حیات خود هرچند کم‌رنگ تا دوره‌ی قاجار ادامه می‌دهد [4-2]. فارغ از این‌گونه یافته‌های باستان‌شناسی اما قدیمی‌ترین شواهد معماری ارگ به سده‌ی ۷ تا ۸ ق.م. برمی‌گردد [5]. باین وجود، غالب آثار معماری فعلی در داخل حصار پیرامونی ارگ، متعلق به دوره‌ی اسلامی است. حاکم‌نشین ارگ، محل استقرار دستگاه حکومتی و عامه‌نشین ارگ، محل زندگی و کسب‌وکار مردم بوده است. بخش عامه‌نشین برخوردار از عموم تأسیسات معماری یک شهر سنتی مثل: بازار، تکیه، مسجد، مدرسه، زورخانه، حمام، اسطبل، کاروانسرا و غیره است. ارگ بم تا اواخر دوره‌ی قاجار مهم‌ترین قانون نظامی و دفاعی جنوب شرق کشور به‌شمار می‌آمده و پیوسته مورد حمله قبایل مهاجم قرار داشته است. بنابراین به‌دفعات تخریب و بارها تعمیر گردیده است [8-6]. ارگ بم تا اواسط قرن ۱۳ هجری همچنان مسکونی بوده است. از آن‌پس به دلیل فراهم شدن امنیت نسبی در منطقه و فرسودگی بافت معماری، رو به متروکه شدن می‌گذارد و شهر امروزی بم در خارج از ارگ گسترش پیدا می‌کند. تقریباً از سال ۱۲۱۹ برابر با ۱۲۵۵ ق.م. است که ساخت شهر تازه تأسیس بم در جنوب شهر کهنه (ارگ) آغاز می‌گردد. پس از خروج مردم، ارتش تا سال ۱۳۰۹ در بخش‌هایی از ارگ به‌ویژه حاکم‌نشین مستقر می‌گردد. از آن‌پس تا سال ۱۳۴۵، ارگ در وضعیتی بالاتکلیف به سر می‌برد. در همین سال، ارگ بم با شماره‌ی ۵۱۹ در فهرست میراث ملی به ثبت می‌رسد. در سال ۱۳۵۰، ارگ بم تحت حفاظت سازمان ملی حفاظت آثار باستانی قرار می‌گیرد. از سال ۱۳۵۱، ارگ بم با تخصیص اعتبار سالیانه مورد تعمیر واقع می‌شود. در سال ۱۳۷۲، ارگ بم به پایگاهی برای پژوهش‌های حوزه میراث فرهنگی تبدیل می‌گردد. سرانجام در تاریخ ۱۳۸۲/۱۰/۵ ارگ بم و سایر بناهای

به ساختار و بروز تنش‌های رفتاری مصالح دخیل هستند و چگونه می‌توان برای رفع یا تعدیل معایب شناخته‌شده قدم برداشت؟ پاسخ این سؤال را باید از میان ویرانه‌های زلزله جست چراکه حقیقت چیزی جدا از درس گرفتن از آموزه‌های زلزله نیست تا در برابر حوادث مشابه با توجه به ظرفیت بالای آن در منطقه، آمادگی و تدارک لازم برای مواجهه با خطرات از طریق اتخاذ تدابیر حفاظتی و مرمتی مناسب و پیشگیرانه برقرار گردد. بخشی از این آمادگی برای مدیریت و کاهش خطرپذیری، از طریق اصلاح شیوه‌های آماده‌سازی و عمل‌آوری مواد اولیه و بازنگری در فرایند تولید و کاربرد مصالح گلین تأمین می‌شود. این هدف، میسر نخواهد بود مگر اینکه در ابتدا، ویژگی‌های ساختمانی خشت‌های موجود مورد شناسایی قرار گیرند و اطلاعات جامعی از وضعیت آن‌ها و نقاط ضعف و قوتشان و مشکلات و چالش‌هایی که برای محوطه ایجاد خواهند کرد به دست آید. آنگاه باید مشخص شود که تدابیر حفاظتی به‌عمل‌آمده تا پیش از زلزله، چه اثراتی بر محوطه داشته‌اند و به دنبال آن، نیازهای حفاظتی محوطه با واقع‌بینی ارزیابی شود. این فرایند منجر به تجویز راهکارهای حفاظتی مؤثرتر و پایدارتر و متناسب با ماهیت اثر می‌گردد.

### ۳. معرفی و شناخت مجموعه ارگ بم

مجموعه معروف به ارگ قدیم، در گوشه‌ی شمال شرقی شهر فعلی بم جای گرفته است (شکل ۱-۱ Fig). یافته‌های باستان‌شناسی پس از زلزله، پیشینه‌ی استقرار در این مکان را به هزاره‌ی ۴ ق.م. می‌رساند. سفال‌های مربوط به ۳۲۰۰ تا ۲۸۰۰ ق.م. در این محوطه شناسایی شده است. بخش دیگری از یافته‌های دوران تاریخی ارگ را سفال‌های ادوار هخامنشی، سلوکی، اشکانی و به‌ویژه ساسانی تشکیل می‌دهد. نمونه‌های متعلق به سده‌های اولیه اسلامی، شامل سفال‌های پوشش گلی، رنگی، سیاه‌وسفید، لعاب گلی چندرنگ، لعاب پاشیده و اسگرافیاتو و سفال‌های بدون لعاب قالب‌زده، استامپی و باربوتین<sup>۱</sup> به‌وفور شناسایی شده‌اند. از سده‌های میانه و متأخر اسلامی نیز نمونه‌های متنوع بسیاری از جمله سفال‌های زیبای نقاشی زیر لعاب و زرین‌فام با نقوش حیوانی،



شکل ۱: منظره هوایی محوطه ارگ بم مربوط به قبل از زلزله [Archive of the base of Arg-e Bam and its cultural landscape]  
Fig: 1: Aerial photo of Arg-e Bam site before the earthquake

ویژگی‌هایی مانند تعیین تخلخل ساختمانی با همان شیوه‌ای که برای آجر و انواع مختلف ملات عمل می‌شود، در مورد خشت به دلیل ضعف مفرط این مصالح نسبت به آب قابل اجرا نبوده و نیازمند روش‌های اصولی دیگری است. طبیعتاً برای تعیین هرچه دقیق‌تر خصلت‌های فیزیکی-شیمیایی خشت‌های تاریخی در شرایطی که تعداد نمونه‌ها اندک است، باید ترتیبی منطقی برای اجرای مناسب آزمایش‌ها در نظر گرفته شود. برای مثال نمونه‌ای که بر روی آن آزمایش استقامت و تعیین ثبات فیزیکی انجام گرفته، پس از خرد شدن نمی‌تواند برای آزمون نفوذپذیری مورد استفاده قرار گیرد. همچنین بسیار دشوار است که آزمایش نفوذپذیری را پیش از آزمون‌های استحکامی انجام داد. در آزمایش نفوذپذیری، نمونه باید در تماس با آب قرار گیرد که در این حالت، پایداری آن بر اثر انحلال و یا سیال شدن بعضی از مواد در آب تغییر می‌کند و حتی دگرگونی‌هایی در جریان خشک شدن نمونه پدید می‌آید.

در مورد خشت‌های فرسایش یافته به نظر می‌رسد جمع‌آوری اطلاعات پیرامون ویژگی‌های هیدرولوژیکی، بسیار مهم‌تر از مقایسه داده‌ها در خصوص وضعیت استحکامی آن‌ها باشد چراکه ساختار آن‌ها پیش‌تر بر اثر نفوذ آب باران تا حدود زیادی تضعیف شده است. بنابراین

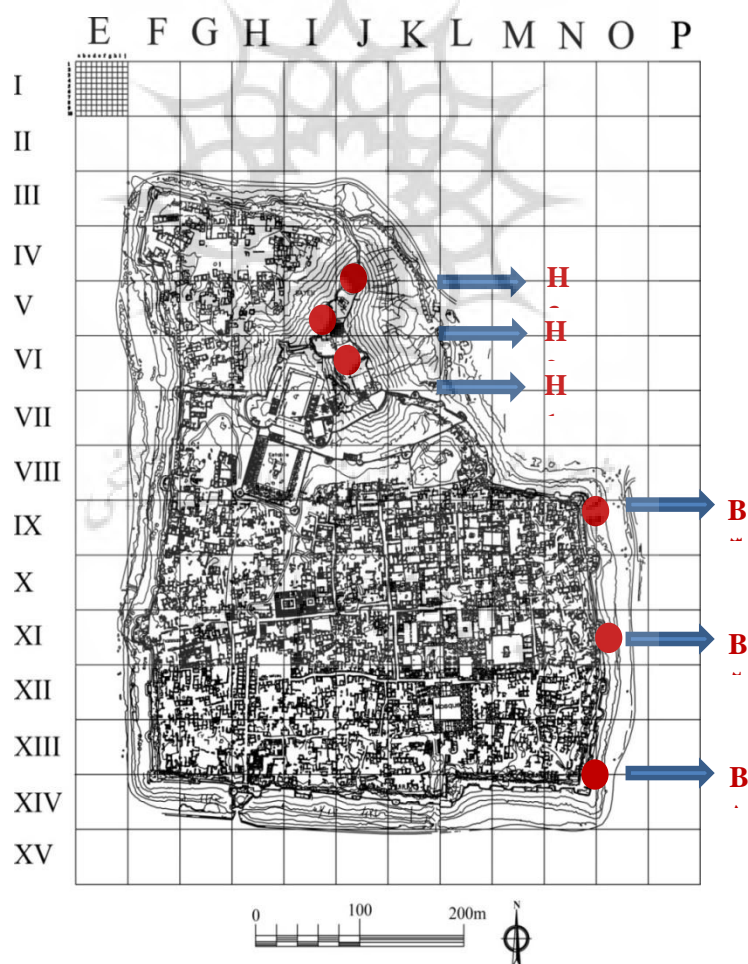
تاریخی شهر بر اثر زلزله، ویران و دچار خسارت قابل ملاحظه‌ای می‌شود. زلزله، شهر بم را به ویرانه‌ای تبدیل کرد. ارگ به شدت آسیب دید. ساختمان‌های آن فروریختند و برج و باروهای آن چنان واژگون شدند که دیگر نتوان از اعتبار و اقتدار گذشته آن‌ها سراغی گرفت. در سایه‌ی این اتفاق ناگوار، توجه جامعه جهانی و ایضاً مجامع داخلی به این اثر ارزشمند بیش از پیش جلب گردید تا اینکه در اجلاس ۲۸ کمیته میراث جهانی که از تاریخ ۷ تا ۱۷ تیرماه ۱۳۸۳ در شهر «سوشو» چین برگزار شد، «بم و منظر فرهنگی آن» با مرکزیت ارگ به‌طور هم‌زمان هم در فهرست «میراث جهانی» و هم «میراث جهانی درخطر» به ثبت رسید [9].

#### ۴. مواد و روش‌های مطالعاتی

برای شناخت دقیق‌تر خصوصیات فنی خشت‌ها، جدا از یافته‌های مربوط به گونه‌شناسی، در اختیار داشتن اطلاعاتی پایه که تعریفی جامع از ساختمان فیزیکی - شیمیایی آن‌ها ارائه دهند اساسی است. پیچیدگی رفتاری چنین مصالحی، نیاز به انجام آزمایش‌های متنوع را اجتناب‌ناپذیر کرده است. انجام برخی از این آزمایش‌ها، فنون ابزاری ویژه و امکاناتی خاص را می‌طلبد تا نمونه‌ها خصلت‌های ذاتی خود را کامل‌تر بروز دهند. برای مثال،

جدا از خشت‌های حصار پیرامونی ارگ که به‌طور مجزا مطالعه شده و ۳۴ شبکه را شامل می‌شود، در ۶۳ شبکه مربوط به محوطه عامه‌نشین و حاکم‌نشین ارگ بم جمعاً ۵۲۹۱ نمونه خشت مورد بررسی گونه‌شناسی قرار گرفت. همچنین سه نمونه از خشت‌های حصار پیرامونی ارگ (با کدهای B1, B2, B3) و سه نمونه از خشت‌های حاکم‌نشین ارگ (با کدهای H1, H2, H3) که موقعیت آن‌ها بر روی نقشه مشخص گردیده، برای بررسی‌های آزمایشگاهی انتخاب شدند (شکل ۲- 2). دلیل انتخاب این نمونه‌ها، جدا از احراز اصالت آن‌ها، جایگاه ممتاز حاکم‌نشین و بارو در روند شکل‌گیری و توسعه ارگ بم است. در همین راستا، آزمایش‌های مربوط به مکانیک خاک در آزمایشگاه پایگاه میراث جهانی چغازنبیل و

برای دستیابی به اطلاعات کامل‌تر باید در انتخاب محل‌های نمونه‌برداری دقت لازم به عمل آید تا خشت‌هایی با حداقل فرسایش برای آزمایش‌های مورد نیاز در اختیار قرار گیرند. این مسئله در مورد ارگ بم با حساسیت ویژه‌ای همراه است چراکه زلزله در غالب قسمت‌ها، لایه‌های معماری و به‌تبع، خشت‌های قدیمی و جدید را درهم‌تنیده و تفکیک این مصالح را برای انتخاب نمونه‌های تاریخی مناسب، پیچیده و دشوار نموده است. برای این منظور، نقشه محوطه ارگ بم به ۹۷ شبکه مربعی  $50 \times 50$  m (زون) تفکیک گردیده و این شبکه پس از پیاده شدن بر بستر ارگ، خانه به خانه تحت پیمایش و بررسی میدانی قرار گرفت و برای هر نمونه خشت، اقدام به تهیه شناسنامه گردید.



شکل ۲: شبکه‌بندی و موقعیت نمونه‌برداری خشت‌های تاریخی ارگ بم | Archive of the base of Arg-e Bam and its cultural landscape

Fig. 2: Grids and Sampling location of the Arg-e Bam

آزمایش‌های شناسایی ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها ( XRD, ) مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها در مرکز پژوهشی متالورژی رازی انجام گرفت. به‌صورت مختصر در جدول ۱ معرفی گردیده است.

جدول ۱: روش‌های آزمایش مورد استفاده در تحقیق

Table 1: Test methods used in the research

Test sets	Standard	Aim	Sample preparation method	Test title
دستگاه اون و هیتر مگنت Oven and magnet heater	-	اندازه‌گیری وزن رس و سیلت، ماسه و گچ To measure the weights of clay, silt, sand and gypsum	<p>خرد کردن نمونه و حرارت دادن در گرمخانه (دمای ۱۱۰C) خارج کردن نمونه از گرمخانه پس از ۲۴ ساعت و توزین ۱۰ g از آن اضافه کردن چند قطره اسید کلریدریک ۱۴٪ به نمونه و حرارت دادن بر روی هیتر</p> <p>هم زدن و جدا کردن ذرات معلق از ذرات جامد ته ظرف (ماسه) با استفاده از کاغذ صافی</p> <p>افزودن چندباره آب مقطر به ماسه‌های ته ظرف و ریختن بر روی کاغذ صافی</p> <p>خشک کردن ماسه‌ها و توزین آن‌ها</p> <p>خشک کردن کاغذ صافی و اندازه‌گیری وزن رس و سیلت آن</p> <p>اضافه کردن چند قطره کلرید باریم (0/2 M) به محلول رد شده از کاغذ صافی و عبور دادن مجدد از کاغذ پس از چند دقیقه، توزین کاغذ صافی و اندازه‌گیری وزن گچ</p> <p>Crashing the sample and heating in the oven (110 degree centigrade)</p> <p>Emitting the sample from the oven after 24 hours and weighting 10 in grams</p> <p>Adding some drips of Hydrochloric Acid 14% to the sample and heating it on the heater</p> <p>Blending and separating the suspending particles from the solid settlements (sands) using a filter paper</p> <p>Drying and weighting the sands</p> <p>Drying the filter paper and measuring the weights of their clay and silt</p> <p>Adding some drips of Barium chloride (0.2 M) into the solution that has already passed through the filter paper, passing through the filter paper again after some minutes, weighting the filter paper and measuring the weight of the gypsum</p>	آنالیز ترکیبی به روش شیمی تر Compound analysis in wet chemical method
-	-	تشخیص وجود سولفات، کلرید و کربنات و کیفیت حضور آن‌ها Specification of existence of sulfate, Chloride and carbonate and their qualities	<p>• آسیاب کردن نمونه به مقدار چند میلی گرم</p> <p>• افزودن ۲ cc آب مقطر به نمونه و هم زدن در لوله آزمایش</p> <p>• فرصت دادن برای تشکیل دو فاز محلول و نامحلول در لوله آزمایش</p> <p>• جدا کردن بخش محلول از نامحلول</p> <p>• افزودن ۱ تا ۲ قطره اسید کلریدریک رقیق (2N) و ۱ تا ۲ قطره محلول کلرید باریم ۱۰٪ به نیمی از محلول. تشکیل رسوب سفید سولفات باریم نامحلول در اسید نیتریک، نشان‌دهنده وجود سولفات است.</p> <p>• افزودن ۱ تا ۲ قطره اسید نیتریک رقیق (2N) و ۱ تا ۲ قطره محلول نترات نقره (0/1N) به نیم دیگر از محلول. تشکیل رسوب ژلاتینی آبی سفید کلرید نقره، نشان‌دهنده وجود کلریدها است.</p> <p>• افزودن ۱ تا ۲ قطره اسید کلریدریک غلیظ به بخش نامحلول. تشکیل حباب‌های گاز دی‌اکسید کربن، نشان‌دهنده حضور یون کربنات است.</p> <p>• Grinding the samples for some milligrams</p> <p>• Adding 2 cc of the distilled water to the sample and blending it</p>	آنالیز کیفی نمک‌های محلول در آب Qualitative analysis of the salts soluble in water



Test sets	Standard	Aim	Sample preparation method	Test title
			<p>in the test tube</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Letting the mixture for creation of the soluble and non-soluble phases in the test tube</li> <li>Separation of the soluble and non-soluble parts</li> <li>Adding 1 to 2 drops of weak hydrochloric acid (2N) as well as 1 to 2 drops of barium chloride 10 percent solution into the half of the solution. Creation of the white settlement of barium sulfate non-soluble in nitric acid proofs availability of sulfate.</li> <li>Adding 1 to 2 drops of weak nitric acid (2N) as well as 1 to 2 drops of silver nitrate (0/1N) into the other half of the solution. Creation of the white blue jelly settlement of silver chloride proofs availability of chlorides.</li> <li>Adding 1 or 2 drops of strong chloride acid into the non-soluble part. Creation of the gas bubbles of carbon dioxide proofs the availability of the carbonate ions.</li> </ul>	
دستگاه کاساگرانده دستگاه اون Casagrande and oven sets	AASHT O T89-68 ASTN D423-66 AASHT O T90-70 ASTN D 424-59	تخمین پتانسیل تورم Estimation of inflation potential	مطابق با استاندارد مربوطه According to the related standards	اندازه‌گیری حدود آتربرگ Measurement of the Atterberg limits
الک‌های مش و ۱۰۰، ۵۰، ۳۰، ۲۰۰ دستگاه اون Sieves of 30, 50, 100, 200 sizes and the oven set	ASTM D 422-87 AASHT O 88-81	اندازه‌گیری بخش ماسه‌ای و غیر ماسه‌ای به صورت توأمان To measure the sand and non-sand parts	مطابق با استاندارد مربوطه According to the related standards	توزیع دانه‌بندی به روش تر Distribution of the grading by wet method
الک‌های مش و ۱۰۰، ۵۰، ۳۰، ۲۰۰ دستگاه اون هیدرومتر Sieves of 30, 50, 100, 200 sizes and the oven set And hydrometer	ASTM D 421-58 & D 422-63 AASHT O T 87-86 & T 8890	جداسازی بخش ماسه‌ای و غیر ماسه‌ای (رس و سیلت) به تفکیک Separation of sand and non-sand (clay) parts	مطابق با استاندارد مربوطه According to the related standards	توزیع دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری Distribution of the grading by sieve and hydrometric method
دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری Compressive force measurement set	-	تحمل و تاب نمونه‌ها در برابر فشار قائم Strength of the samples against the vertical pressure	برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، نمونه‌هایی در ابعاد ۵×۵×۵ cm تهیه و آنگاه به مدت ۲۴ ساعت در اجاق الکتریکی و در دمای تقریبی ۱۰۰C خشک شدند. In order to measure the compressive strength, samples were provided in the dimension of 5*5*5 cm and dried out in the electric oven in the approximate temperature of 100 degree centigrade.	اندازه‌گیری مقاومت فشاری Measurement of the compressive strength
SEIFERT 3000 T 2 T	-	شناسایی فازهای اصلی و فرعی به صورت نیمه کمی Recognition of the main phases and sub-phases in a semi-	آسیاب کردن نمونه، تهیه قرص و وارد کردن در دستگاه Grinding the sample and creation of a tablet and inputting it into the set	تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRD Adjustment of the chemical component by XRD method

Test sets	Standard	Aim	Sample preparation method	Test title
		quantitative manner		
PHILIPS X UNITUI II	-	شناخت ترکیب شیمیایی عنصری به صورت کمی Recognition of the elements of the chemical component in a quantitative manner	آسیاب کردن نمونه، تهیه قرص و وارد کردن در دستگاه Grinding the sample and creation of a tablet and inputting it into the set	تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF Adjustment of the chemical component by XRF method

### ۵. گونه‌شناسی خشت‌های ارگ بم

هدف از گونه‌شناسی، شناخت خصوصیات ماکروسکوپی خشت‌های به‌کاررفته (اعم از ابعاد، بافت، رنگ، پرکننده‌ها) و فراهم آمدن بستر مناسبی برای مطالعات فن‌شناسی و آسیب‌شناسی خشت‌ها است. اهمیت این مطالعه از آنجاست که می‌توان تا حدود زیادی، خشت‌های قدیمی و جدید را از یکدیگر تمیز داد و نمونه‌های مناسب و قابل اطمینانی برای ادامه مطالعات برگزید. در اجرای این طرح، جدا از بررسی‌های میدانی، به سوابق باستان‌شناسی و گزارش‌های حفاظتی و مرمتی مجموعه رجوع و استناد شده است. در شرایط طبیعی به دلیل پنهان بودن حجم غالب خشت‌ها در عمق لایه‌های معماری، مطالعه گونه‌شناسی با پیچیدگی و دشواری زیادی همراه است اما در ارگ بم، زلزله و تخریب گسترده ناشی از آن باعث شده طیف متنوع مصالح به‌کاررفته در بناها به‌راحتی در دسترس قرار گیرند و زمینه‌ی مناسبی برای گونه‌شناسی خشت‌ها فراهم گردد. در این راستا از انواع مختلف خشت‌های موردبررسی، نمونه‌برداری انجام گرفت و در مرکزی تحت عنوان بانک خشت برای مطالعات آتی طبقه‌بندی شد. مطالعه ماکروسکوپی خشت‌های ارگ بم منجر به ارائه اطلاعات مفیدی در خصوص شرایط عمومی زندگی و فضای حاکم بر مجموعه در دوره‌های مختلف تاریخی گردید. تهیه بانک اطلاعاتی خشت‌های ارگ بم و برنامه‌ریزی برای انتخاب و تولید خشت‌های مناسب جهت اقدامات حفاظتی و مرمتی این محوطه میراث جهانی از طریق سنجش ویژگی‌های بصری خشت‌های مختلف به‌کاررفته، دستاورد مهم این مرحله از تحقیق است. گونه‌شناسی خشت‌های ارگ بم طبق نمونه

فرم زیر بر اساس خصوصیات ظاهری، ریخت و موقعیت آن‌ها ثبت گردید (جدول ۲-2 Table).

نتایج کلی گونه‌شناسی خشت‌های ارگ بم به شرح زیر است:

۱) خشت‌های محوطه ارگ بم را به لحاظ قدمت و پیشینه‌ی استفاده می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد. «خشت‌های نوع اول» که از زمان ساخت بنا تا متروکه شدن ارگ را در برمی‌گیرد و «خشت‌های نوع دوم» که از زمان آغاز تعمیرات ثبت‌شده ارگ (سال ۱۳۳۸ خورشیدی) تا به امروز را شامل می‌شود. خشت‌های نوع اول را می‌توان «خشت‌های قدیمی» و خشت‌های نوع دوم را «خشت‌های جدید» نام‌گذاری کرد.

۲) بیشترین تمرکز خشت‌های تاریخی پهن‌پیکر در حاکم‌نشین ارگ، حصارهای ارگ و معدودی از بناهای عامه‌نشین ارگ مثل اسطبل و مسجد جامع مشاهده می‌شود.

۳) از نظر ابعاد، بیشترین فراوانی مربوط به خشت‌هایی با ابعاد ۲۳×۲۳×۵cm است (حدود ۵۵٪) و در مرتبه بعد خشت‌هایی با ابعاد ۲۵×۲۵×۵cm قرار دارند (حدود ۲۵٪). از ۲۰٪ تقریبی باقی‌مانده، کمتر از نیمی از خشت‌ها دارای ابعاد ۲۰×۲۰×۴cm هستند و مابقی در ابعاد ۲۷×۶cm، ۲۷×۳۵×۶cm، ۳۲×۳۲×۸cm، ۳۰×۳۰×۶cm، ۳۷×۳۷×۷cm، ۴۰×۴۰×۱۰cm، ۴۱×۴۱×۱۲cm و ۴۶×۴۶×۱۶cm ساخته شده‌اند. در مورد حصار پیرامونی ارگ، ابعاد خشت‌های به‌کاررفته عموماً ۲۳×۲۳×۵cm، ۲۵×۲۵×۵cm، ۲۷×۲۷×۵cm، ۳۳×۳۳×۵cm، ۳۳×۳۳×۷cm، ۳۵×۳۵×۷cm، ۳۶×۳۶×۱۲cm، ۳۸×۳۸×۸cm، ۴۰×۴۰×۱۰cm، ۴۵×۴۵×۱۰cm

جدول ۲: نمونه فرم گونه‌شناسی خشت‌های ارگ بم

Table 2: A sample form of the typology of the adobes of the Bam citadel

موقعیت Location	Zone: IV.G زون: IV.G	فضا: اتاق E Ambient: Room E	بدنه: شمالی Body: Northern
نوع Type	دسته: اول Group: First	توضیح: خشت قدیمی (مربوط به قبل از تعمیرات سال ۱۳۳۸ خورشیدی) Explanation: Old adobe (belonging to the repairs prior to the restorations on 1959)	
ابعاد Dimensions	طول: ۲۳ cm Length: 23 cm	عرض: ۲۳ cm Width: 23 cm	ضخامت: ۴ cm Thickness: 4 cm
بافت Texture	سختی: متوسط Hardness: Medium	تراکم: دارای منافذ زیاد Density: Porous	دانه‌بندی: درشت و ناهمگن Gradation: Rough and heterogeneous
رنگ Color	کد: ۶/۶ Code: 6/6	رنگ‌مایه: زرد مایل به قهوه‌ای روشن Pigment: Yellow and light brown	توضیح: بر اساس جدول مانسل Explanation: according to the Mansell table
پرکننده Filler	وجود: دارد Exists: Yes	جنس: خرده‌سنگ، خرده آجر، خرده چوب، کاه درشت، مو Crashed stone, fired brick and wood; rough straw and hair	

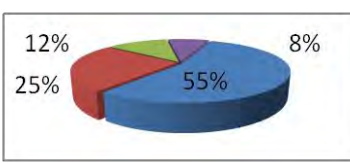
نمونه شاخص و شاهد است. مهم این است که شرایط اعمال شده برای مقایسه، تا حد امکان در مورد همه‌ی نمونه‌ها ثابت و یکسان در نظر گرفته شود. در این بررسی، نمونه‌ی شاخص، خشتی است که با بهترین خاک منطقه و با رعایت قواعد مربوط به آماده‌سازی خاک، عمل‌آوری گل، قالب‌گیری و خشک‌کردن در شرایط میدانی تهیه شده است. برای انتخاب بهترین خاک منطقه، مطالعات زمین‌شناسی جداگانه‌ای انجام گرفته است. معیار مقایسه استحکام سطحی خشت‌ها، وزن خاک از دست‌رفته‌ای است که بر اثر خراشیدن، تراشیدن یا سائیدن کنترل‌شده‌ی خشت در اختیار قرار می‌گیرد و با نمونه‌ی شاهد مطابقت داده می‌شود. در این بررسی به‌طور قراردادی، سختی مطلوب به نمونه‌هایی اطلاق شده که وزن خاک از دست‌داده‌ی آن‌ها در محدوده نمونه شاهد است. سختی

و  $10 \times 60 \times 60$  cm اندازه‌گیری شده است. حدود ۵۰٪ خشت‌های حصار پیرامونی، ابعادی بین  $5 \times 33 \times 33$  cm تا  $8 \times 38 \times 38$  cm دارند (جدول ۳-۳ Table 3). (۴) از نظر بافت (سختی)، حدود ۱۵٪ خشت‌ها دارای سختی مطلوب، حدود ۳۵٪ خشت‌ها دارای سختی نامطلوب و حدود ۵۰٪ خشت‌ها در وضعیت حد واسط قرار دارند. معیار تشخیص و تخمین وضعیت سختی خشت‌ها، مقایسه آن‌ها با یک نمونه خشت شاخص و بهینه‌سازی شده بر اساس استانداردهای شماره‌ی ۸۶۱، ۸۴۸، ۸۴۹، ۸۵۱ و ۱۱۶۲ ایران (خصوصیات خاک مناسب برای تهیه خشت) است (جدول ۴-۵ Tables 4,5). تعبیر از سختی درواقع، استحکام سطحی خشت است. استحکام سطحی خشت‌ها برخلاف پارامترهایی مثل مقاومت فشاری، قابل‌اندازه‌گیری دستگامی نیست اما قابل‌مقایسه با یک

جدول ۳: فراوانی خشت‌های حاکم‌نشین و عامه‌نشین ارگ بم بر اساس ابعاد

Table 3: Quantities of the adobes of the Bam citadel according to the dimensions

درصد Percentage	شرح Dimensions
55	23×23×5 cm
25	25×25×5 cm
8	20×20×4 cm
12	سایر ابعاد Other dimensions



جدول ۴: ویژگی‌های شیمیایی خاک مناسب برای تهیه خشت [10]

Table 4: Chemical characters of the suitable soil for production of the adobe

No.	شیمیایی ترکیب Chemical components	حد مطلوب Desired amount	روش آزمایش Examination standard
1	اکسید سیلیسیم SiO <sub>2</sub> silicon oxide SiO <sub>2</sub>	40-60 %	استاندارد شماره ۸۶۱ ایران Standard number 861 Iran
2	اکسید آلومینیوم Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminum oxide Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9-21 %	استاندارد شماره ۸۴۸ ایران Standard number 848 Iran
3	اکسید آهن Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Iron oxide Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-12 %	استاندارد شماره ۸۴۹ ایران Standard number 849 Iran
4	اکسید کلسیم CaO Calcium oxide CaO	Max 17 %	استاندارد شماره ۸۵۱ ایران Standard number 851 Iran
5	اکسید منیزیم MgO Magnesium oxide MgO	Max 4 %	استاندارد شماره ۸۵۱ ایران Standard number 851 Iran
6	انیدرید کربنیک CO <sub>2</sub> Carbon dioxide CO <sub>2</sub>	Max 8.5 %	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
7	انیدرید سولفوریک SO <sub>3</sub> Sulfur trioxide SO <sub>3</sub>	Max 0.5 %	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
8	کلریدهای سدیم و پتاسیم Sodium and Potassium chlorides	Max 0.1 %	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
9	افت وزن بر اثر سرخ شدن Weight loss due to the heating	Max 16 %	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran

جدول ۵: ویژگی‌های فیزیکی خاک مناسب برای تهیه خشت [10]

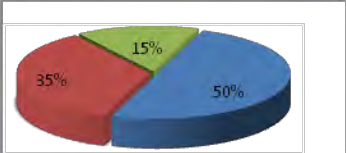
Table 5: Physical characters of the suitable soil for adobe production

No.	نوع آزمایش Test type	حد مطلوب Desired amount	روش آزمایش Examination standard
1	مانده روی الک ۱۴۹ میکرونی (۱۰۰مش)، %wt Remained on the 149 micron sieve	Max 7.5	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
2	حد حالت روانی Liquid limit	-	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
3	حد حالت خمیری Plastic limit	17-30	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran

جدول ۶: فراوانی خشت‌های ارگ بم بر اساس بافت/ سختی

Table 6: Quantities of the adobes of the Bam citadel according to the hardness

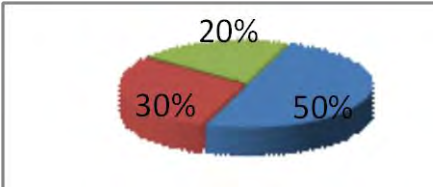
درصد Percentage	شرح Description
15	دارای سختی مطلوب Desirable hardness
50	دارای سختی حد واسط Medium hardness
35	دارای سختی نا مطلوب Undeniable hardness



جدول ۷: فراوانی خشت‌های ارگ بم بر اساس بافت/تراکم

Table 7: Quantities of the adobes of the Bam citadel according to the texture/ density

درصد Percentage	شرح Description
30	دارای منافذ کم Limited porous
50	دارای منافذ حد واسط Medium porous
20	دارای منافذ زیاد Lots of porous



حد واسط آن‌هایی هستند که وزنشان بین ۰/۹ تا ۰/۶ نمونه‌ی شاهد است و نمونه‌های دارای منافذ زیاد، خشت‌هایی را شامل می‌شود که وزن آن‌ها کمتر از ۰/۶ نمونه‌ی شاهد بوده است (جدول ۷-Table 7).

۶) از نظر بافت (دانه‌بندی)، حدود ۳۵٪ خشت‌ها دارای دانه‌بندی ریز و همگن و حدود ۶۵٪ خشت‌ها دارای دانه‌بندی درشت و ناهمگن هستند. معیار بررسی وضعیت دانه‌بندی خشت‌ها، انجام آزمون دانه‌بندی به روش خشک با استفاده از الک‌های مش ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ بر اساس استانداردهای ASTM D 422-87 & AASHTO 88-81 است. برای این منظور مقداری از نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰C ذک خشک شده و ۱۰۰g از آن روی الک مش ۲۰۰ با آب به آرامی مالش داده و شسته می‌شود. هر آنچه از نمونه خشت روی الک باقی بماند، پس از خشک کردن با شرایط ذکر شده، روی الک‌های مش ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سرنند می‌شود و دانه‌های باقی‌مانده روی هر الک معیار مقایسه دانه‌بندی قرار می‌گیرد (جدول ۸-Table 8).

۷) از نظر رنگ، حدود ۷۵٪ خشت‌ها دارای رنگ زرد مایل به قهوه‌ای روشن (کد ۶/۶ جدول مانسل)، حدود

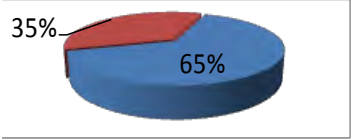
حد واسط آن‌هایی هستند که وزن خاک از دست داده‌شان بین ۲ تا ۳ برابر نمونه‌ی شاهد است و سختی نامطلوب نیز خشت‌هایی را شامل می‌شود که وزن خاک از دست‌داده آن‌ها بیش از ۳ برابر نمونه‌ی شاهد بوده است (جدول ۶-Table 6).

۵) از نظر بافت (تراکم)، حدود ۲۰٪ خشت‌ها دارای منافذ زیاد، حدود ۳۰٪ خشت‌ها دارای منافذ کم و حدود ۵۰٪ خشت‌ها در وضعیت حد واسط قرار دارند. معیار تشخیص و تخمین وضعیت تراکمی خشت‌ها، مقایسه آن‌ها با یک نمونه خشت شاخص و بهینه‌سازی شده بر اساس استانداردهای شماره‌ی ۸۶۱، ۸۴۸، ۸۴۹، ۸۵۱ و ۱۱۶۲ ایران (خصوصیات خاک مناسب برای تهیه خشت) است. در این بررسی، اقدام به تهیه نمونه‌های ۵×۵×۵cm از خشت‌های موردتحقیق می‌گردد، وزن آن‌ها اندازه‌گیری شده و با نمونه‌ی شاهد که پیش‌تر روال ساخت آن توضیح داده شد مطابقت داده می‌شوند. طبیعتاً هر چه قدر وزن نمونه‌ها بیشتر باشد نشان‌دهنده‌ی منافذ و فضاهای خالی کمتر خواهد بود. در این بررسی به‌طور قراردادی، نمونه‌های با منافذ کم به خشت‌هایی اطلاق شده که وزن آن‌ها در محدوده نمونه‌ی شاهد است. نمونه‌های با منافذ

جدول ۸: فراوانی خشت‌های ارگ بم بر اساس بافت/دانه‌بندی

Table 8: Quantities of the adobes of the Bam citadel according to the gradation

درصد Percentage	شرح Description
65	دانه‌بندی درشت و ناهمگن Rough and heterogeneous
35	دانه‌بندی ریز و همگن Tiny gradation





شکل ۳: نمونه برداری و بررسی خصوصیات ماکروسکوپیک خشت‌های محوطه ارگ بم  
Fig: 3: Sampling and investigation of the macroscopic properties of the adobes of the Arg-e Bam site

عمده در آن، متصوّر است رنگ‌مایه‌های دیگری به این فهرست اضافه شوند.  
۸) از نظر نوع افزودنی، بیشترین مقدار مصرف پرکننده‌ها در خشت‌ها به ترتیب شامل: الیاف گیاهی (کاه)، خرده‌سنگ، شن ریزه، خرده آجر، فضولات حیوانی، قطعات چوب، خرده سفال، قطعات زغال، خرده استخوان، ذرات گچ، مو و هسته‌ی خرما است (شکل ۳ و ۴، Fig: 3,4- و جدول ۹-9 Table).

۹) این همه تنوع در ابعاد، بافت، رنگ و پرکننده‌های

۱۵٪ خشت‌ها دارای رنگ زرد مایل به قهوه‌ای (کد ۵/۳ جدول مانسل) و حدود ۱۰٪ خشت‌ها دارای رنگ قهوه‌ای روشن با ته رنگ خاکستری (کد ۵/۴ جدول مانسل) هستند. گفتنی است این بررسی مربوط به خشت‌های محوطه حاکم‌نشین و عامه‌نشین ارگ است و خشت‌های حصار پیرامونی ارگ که ۳۴ زون از ۹۷ زون را شامل می‌شود فعلاً در برنمی‌گیرد. دلیل آن نیز اولویت بررسی دیگر شاخص‌ها بوده است. با این وجود نظر به گستردگی حصار پیرامونی ارگ و دخل و تصرف‌های

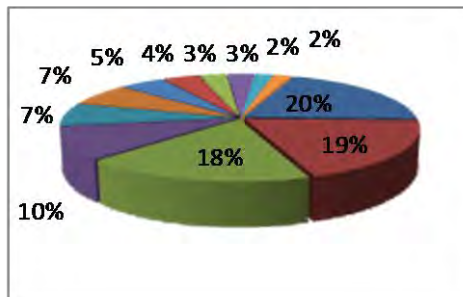


شکل ۴: وجود اجزای زائد (خاشاک و فضولات حیوانی) در نمونه خشت H3.  
Fig: 4: Brushwood and animal excreta in the adobe sample H3

جدول ۹: فراوانی خشت‌های ارگ بم بر اساس نوع پرکننده

Table 9: Quantities of the adobes of the Bam citadel according to the additives

درصد Percentage	شرح Description
20	الیاف گیاهی (کاه گندم) Herbal fibers (straw)
19	خرده سنگ Crashed stone
18	شن ریزه Sand
10	خرده آجر Crashed fired brick
7	فضولات حیوانی Garble
7	قطعات چوب Wood
5	خرده سفال Potsherds
4	قطعات ذغال Coal
3	خرده استخوان Bone
3	ذرات گچ Gypsum
2	مو Hair
2	هسته خرما Palm date seed

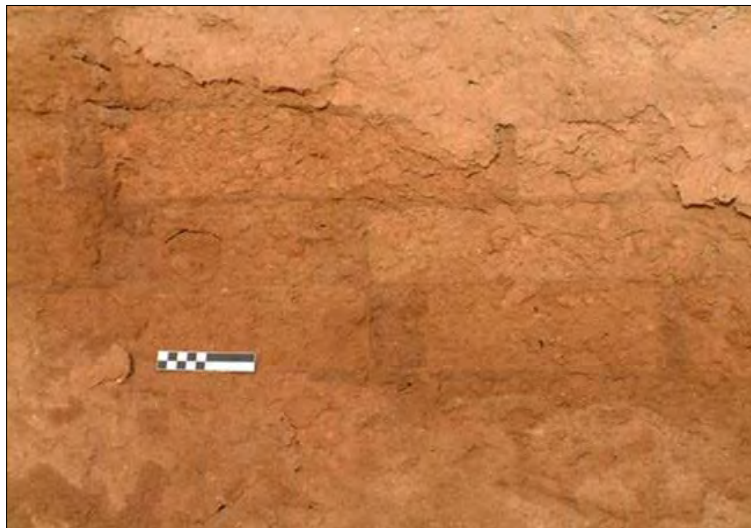


ناشی از درصد زیاد رس و استفاده بیش از اندازه از آب هنگام تهیه ملات گل است. نوع کانی رسی در بیشتر نمونه‌ها ایلیت و از گروه هیدرومیکا است. در یک نمونه، کانی گروه کائولینیت و در دو نمونه، کانی گروه مونتموریلونیت شناسایی شده است. سایر کانی‌های موجود عمدتاً شامل زئولیت‌ها، فلدسپات‌های سدیک، پتاسیک و سرپانتین‌ها هستند که در رفتار مکانیکی خاک بی‌تأثیر یا کم‌تأثیراند. بیشترین استحکام مربوط به نمونه‌ای است که کانی رسی گروه کائولینیت داشته و کمترین پایداری مربوط به نمونه‌ای بوده که دارای کانی گروه مونتموریلونیت است [11]. پژوهش دیگر در ارتباط با مسجد جامع ارگ بم صورت گرفت، در طی آن ۱۵ نمونه از چهار ایوان و دو شبستان مسجد برداشت شد، هدف از این تحقیق مشخص کردن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خشت‌ها، تعیین درصد رطوبت، تعیین دانسیته و سنجش مقاومت فشاری و خمشی خشت‌ها بوده است. نتایج پژوهش‌ها نشان دادند که درصد وزنی رطوبت نمونه خشت‌های مورد آزمون بین ۰/۷٪ تا ۱/۷٪ متغیر است که دامنه‌ی اختلاف زیادی را نشان نمی‌دهد؛ چگالی نمونه‌ها بین ۱/۳ تا ۱/۷ متغیر است که دامنه‌ی اختلاف زیادی را نشان نمی‌دهد؛ مقاومت فشاری نمونه‌ها جزء در یک مورد که  $20/1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  اندازه‌گیری شده، در مابقی بین

موجود در خشت‌ها، به‌نوعی می‌تواند بهره‌گیری از ذخایر متعدد خاک، تعدد دوره‌های تاریخی و مرمتی ارگ و متفاوت بودن شرایط اجتماعی و اقتصادی حاکم بر ساخت مجموعه را متصور سازد.

## ۶. ساختارشناسی و تحلیل نتایج

مطالعات مرتبط با ساختارشناسی خشت‌های ارگ بم پیش‌تر در دو نوبت انجام شد؛ نخست از برج شماره‌ی یک در حصار محیطی ۱۰ نمونه برداشت شد و آزمایش‌های تعیین درصد رطوبت، تعیین سطح مخصوص کلی رس‌ها و سطح مخصوص کلی خاک با محلول متیلن بلو و تعیین میزان انقباض طولی و کانی‌شناسی با روش XRD انجام گرفت. برآیند آن پژوهش نشان داد که درصد رطوبت در نمونه‌های مورد آزمایش از ۱,۵٪ تا ۳٪ متغیر است که دامنه‌ی اختلاف زیادی را نشان نمی‌دهد؛ اگر اعداد و ارقام به‌دست‌آمده برای سطح کلی رس‌ها را بتوان به میزان کانی‌های رسی و ریزدانه‌ی خاک‌ها نسبت داد که به‌شدت بر چسبندگی آن‌ها اثرگذار هستند، می‌توان نتیجه گرفت که صرف ریزدانه بودن خاک، دلیل بر چسبندگی زیاد آن نخواهد بود؛ چراکه ممکن است نمونه از حیث کانی رسی مرغوب، فقیر باشد. میزان انقباض از ۲,۵٪ تا ۵٪ متغیر است. افزایش انقباض و ترک‌خوردگی،



شکل ۵: تنوع رنگی خشت‌های مورد استفاده  
Fig: 5: Color diversity of the Adobes

خشت‌های حصار پیرامونی که ۳۴ زون از ۹۷ زون را شامل می‌شود، در بر نگرفته است. در مورد خشت برخلاف آجر، تنوع رنگی، دامنه‌ی خیلی وسیعی را شامل نمی‌شود.

۲) حجم غالب مصالح به‌کاررفته در محوطه را خشت‌هایی تشکیل داده‌اند که در ساخت آن‌ها از پرکننده‌ها استفاده شده است. ابتکار ساخت چنین خشت‌هایی در صورت استفاده آگاهانه از مواد افزودنی می‌تواند ریشه در چند عامل داشته باشد. نخست، اصلاح رفتار خشک شدن و کنترل ترک‌خوردگی خشت‌ها. دوم، سرعت بخشیدن به فرآیند خشک شدن خشت‌ها. سوم، کاستن از مقدار کاه برای تهیه خشت‌ها. چهارم، صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه در مصرف خاک.

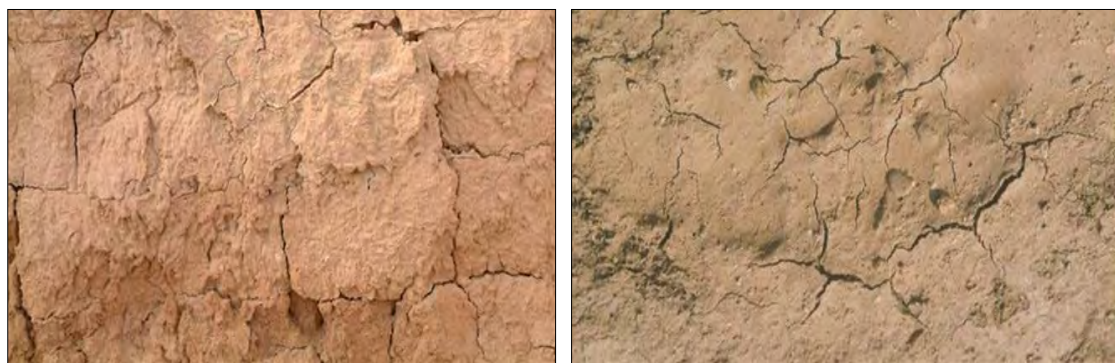
۳) خشت‌های استفاده‌شده در بخش‌های مختلف محوطه به‌ویژه برحسب ارتفاع، تفاوت آشکاری را از نظر تراکم منافذ سطحی نشان می‌دهند. این پدیده گرچه می‌تواند ناشی از تفاوت کالبدی خشت‌ها با یکدیگر و یکسان نبودن مراحل ساخت باشد، اما از طرفی دیگر فرم معماری مجموعه و کیفیت اثرگذاری عوامل محیطی، در پیدایش چنین وضعیتی نقش کاملاً مؤثری داشته است. به‌طور کلی، خشت‌های محوطه در ارتفاعات، به دلیل فرسایش بیشتر دارای بافت سطحی پر منفذی هستند ولی در نواحی پایین‌تر به خاطر رسوب گرفتگی، از منافذ

$7 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  تا  $13$  است که چندان مناسب نیست. این عدم رضایت، هم به خاطر مطلوب نبودن مقاومت فشاری خشت‌هاست و هم به خاطر دامنه‌ی نوسان مقاومتی زیاد بین نمونه‌ها؛ مقاومت خمشی نمونه‌ها جزء در یک مورد که  $10/6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  اندازه‌گیری شده، در مابقی نمونه‌ها بین  $3 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  تا  $8$  است که چندان مناسب نیست. این عدم رضایت، هم به خاطر مطلوب نبودن مقاومت خمشی خشت‌هاست و هم به خاطر دامنه‌ی نوسان مقاومتی زیاد بین نمونه‌ها و میزان نفوذپذیری و کشش موئینگی نمونه خشت‌های مورد آزمون، جزء در یک مورد که  $9/7$  اندازه‌گیری شده، در مابقی نمونه‌ها بین  $4$  تا  $8$  واحد است [12].

از مجموع مطالعات و آزمایش‌های فیزیکی-مکانیکی و شیمیایی انجام‌گرفته، نتایج زیر حاصل شده است:

۱) خشت‌های استفاده‌شده در محوطه از تنوع رنگی محسوسی برخوردارند (شکل ۵-۵، Fig: 5-5). این موضوع می‌تواند به‌نوعی نشان‌دهنده بهره‌گیری از ذخایر متعدد خاک برای ساخت خشت‌ها باشد (لازم به توضیح است که برای بررسی طیف رنگی، نمونه‌ها به مدت  $24$  ساعت در دمای  $100$  تا  $110^\circ\text{C}$  خشک می‌شوند و رطوبت ظاهری، معیار قضاوت نخواهد بود). همان‌گونه که در بخش گونه‌شناسی اشاره شد، این ۳ طیف رنگی مربوط به خشت‌های محوطه عامه‌نشین و حاکم‌نشین ارگ هستند و





شکل ۶: نمونه‌ای از الگوهای ترک‌خوردگی خشت‌ها

Fig: 6: Examination of the porosity

تخلخل قابل توجه و درعین حال قابل‌انتظاری دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از ضخامت زیاد، تراکم کم و نیاز به حجم انبوه خشت برای ساخت‌وسازهای پی‌درپی و مرمت‌های مداوم محوطه بوده باشد. هرچند باید پذیرفت پوسیدگی الیاف گیاهی به‌کاررفته در خشت‌ها و همچنین اضمحلال برخی از اجزای ساختمانی آن‌ها بر اثر انحلال و سایر عوامل، در بالا بردن نسبت تخلخل کاملاً مؤثر نشان داده‌اند (شکل ۷-۷ Fig).

۸) در توزیع دانه‌بندی خشت‌ها و همچنین توزیع اجزای ساختاری آن‌ها تفاوت‌های قابل‌ملاحظه‌ای به چشم می‌خورد (جدول ۱۰، ۱۱، ۱۲-Tables 10,11,12). این تفاوت‌ها افزون بر اینکه می‌توانند به‌نوعی نشان‌دهنده‌ی تعدد ذخایر خاک استفاده‌شده برای ساخت خشت‌ها باشند، احتمال آمیزش دو یا چند نمونه خاک در نسبت‌های مشخص باهدف دستیابی به یک ذخیره مناسب را نیز بسیار ضعیف نشان می‌دهند چراکه در این



شکل ۷: بررسی وضعیت تخلخل در خشت‌های مورد مطالعه

Fig: 7: Investigation of the porosity of the studied adobes

کمتری برخوردارند. این مسئله به ماندگاری بهتر آن‌ها کمک کرده است.

۴) برای بهبود رفتار خشک شدن خشت‌ها غالباً از الیاف گیاهی (کاه گندم) و ماسه که در مجاورت با رطوبت دستخوش تغییرات ابعادی قابل‌ملاحظه نمی‌گردند، استفاده شده است. گرچه تعیین حجم نسبی الیاف به‌کاررفته در خشت‌ها به دلیل پوسیدگی آن‌ها مقدور نیست (این امر می‌تواند ناشی از تولید اسیدلاکتیک در ساختمان خشت باشد) اما در مورد ماسه امکان‌پذیر است. ۵) میزان مرغوبیت خشت‌ها دست‌کم از نظر خصوصیات ساختمانی ظاهری (ویژگی‌های ماکروسکوپیک)، بسته به محل مورداستفاده تفاوتی آشکار و به همان اندازه هدف‌دار را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد نابرابری ارزش‌های کارکردی واحدهای تشکیل‌دهنده‌ی مجموعه در این باره بی‌تأثیر نبوده است. به تعبیری، دقت در تولید و کیفیت محصول، به‌نوعی تابع اهمیت بنا نشان می‌دهد.

۶) تنوع الگوهای ترک‌خوردگی و فرسایش در خشت‌های محوطه می‌تواند نشان از تفاوت ساختاری و توزیع دانه‌بندی آن‌ها داشته باشد. این الگوها قابلیت آن را دارند تا در کنار دیگر شواهد، به‌نوعی استفاده از ذخایر مختلف خاک از نظر محل تأمین و یا کیفیت بهره‌برداری و عمل‌آوری برای تهیه خشت‌های مورداستفاده در عمر طولانی حیات مجموعه را توجیه نمایند (شکل ۶-۶ Fig).

۷) در ساختمان خشت‌ها به‌ویژه بافت داخلی آن‌ها

جدول ۱۰: آنالیز ترکیبی به روش شیمی تر

Table 10: Synthetic analysis in wet chemical approach

کد نمونه Sample code	درصد رس و سیلت Clay and silt percentage	درصد ماسه Sand percentage	درصد گچ Gypsum percentage	درصد بست حل شده Solutions percentage	جمع کل Total
B1	51.3	32.6	0.07	16.03	100
B2	42.7	40.7	0.07	16.53	100
B3	43	40.2	0.07	16.73	100
H1	39.1	43.2	1.03	16.67	100
H2	38.1	45.8	0.59	15.51	100
H3	40	42.2	1.03	16.77	100

جدول ۱۱: توزیع دانه‌بندی به روش تر

Table 11: Grading distribution by wet method

کد نمونه Sample code	درصد رس و سیلت Percentage of clay and silt	درصد ماسه Percentage of sand	جمع کل Total
B1	79.78	20.22	100
B2	75.03	24.97	100
B3	75.1	24.9	100
H1	62.89	37.11	100
H2	58.55	41.45	100
H3	62.12	37.88	100

وزن‌های مورد اشاره در ۱۰۰g از خاک خشک شده هر نمونه به‌دست آمده‌اند. در این روش دانه‌بندی تنها از الک استفاده می‌شود و بنابراین تنها دو بخش کلی غیرماسه‌ای و ماسه‌ای به‌صورت تفکیک شده است.

Appointed weights have been measured in 100 grams of the dried soil of each sample. In this method, sieve is the only tool for grading and therefore, we will have the two parts of sands and non-sands.

جدول ۱۲: توزیع دانه‌بندی به روش الک/هیدرومتری

Table 12: Grading distribution by sieve/hydrometric method

کد نمونه Sample code	درصد ذرات بالاتر از قطر mm ۰/۰۷۵ Percentage of the particles larger than 0.075 mm	درصد ذرات بالاتر از قطر mm ۰/۰۳ Percentage of the particles larger than 0.03 mm	درصد ذرات بالاتر از قطر mm ۰/۰۰۵ Percentage of the particles larger than 0.005 mm	درصد ذرات بالاتر از قطر mm ۰/۰۰۱ Percentage of the particles larger than 0.001 mm
B1	9.2	40	69	82.15
B2	11.4	64	79	80.05
B3	10.2	33	76	82.15
H1	11.3	55	76	83.83
H2	11.5	25	58	74.8
H3	10.8	39	70	79.63

استادکار خشت‌مال ضرورتی برای این منظور احساس نکرده است (شکل ۴-۴ Fig).

مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت فشاری خشت‌ها با ساختمان دانه‌بندی آن‌ها نشان می‌دهد در نمونه‌هایی که توزیع دانه‌بندی متناسب‌تر است، مقاومت فشاری افزایش یافته است (جدول ۱۳-۱۳ Table). مشخصاً با افزایش مقدار ماسه و گچ در نمونه‌ها، افت مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. این مسئله می‌تواند ناشی از کاهش چسبندگی ذرات خاک به خاطر پائین آمدن نسبت رس باشد.

حالت انتظار می‌رود اختلاف بین اجزاء تشکیل‌دهنده خشت‌ها نوسانی متعادل و متوازن داشته باشد.

وجود ناخالصی‌هایی از قبیل زغال، خاشاک، استخوان، سنگ، گچ و غیره در عموم خشت‌های مورد بررسی، گویای این واقعیت است که فرایند آماده‌سازی خاک و عمل‌آوری گل به‌خوبی انجام نشده است. حداقل در مورد نمونه‌های مورد آزمون به نظر نمی‌رسد دلیل وجود ناخالصی‌های متعدد، تعجیل در تهیه خشت‌ها بوده باشد، چراکه وضعیت تخلخل، چندان در جهت تأیید این مسئله نیست. بیشتر چنین می‌نماید که

انحلال نمک‌های محلول در آب نسبت داد (جدول ۱۴-Table 14).

(۱۲) مشخصاً خشت‌های مربوط به حصار و خشت‌های مربوط به حاکم‌نشین از نظر توزیع و ترکیب دانه‌بندی، حدود آتربرگ و مقاومت فشاری به میزان قابل توجهی متمایز از یکدیگر نشان می‌دهند. این تمایز ساختاری، جدا از احتمال تفاوت ذخایر خاک مورد استفاده برای ساخت خشت‌ها، متصور است که می‌تواند به عدم هم‌زمانی و یکسان نبودن شرایط ساخت تأسیسات معماری وابسته به حاکم‌نشین با جدیدترین و بیرونی‌ترین لایه حصار پیرامونی ارگ تفسیر شود. (۱۳) مطالعه میکروسکوپی<sup>۲</sup> دانه‌بندی خشت‌ها نشان می‌دهد که اکثر ذرات خاک دارای اشکال گرد و منحنی

جدول ۱۳: اندازه‌گیری مقاومت فشاری

Table 13: Measurement of the compressive strength

کد نمونه Sample code	مقاومت فشاری (kg/cm <sup>2</sup> ) Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )
B1	20
B2	38
B3	22
H1	10
H2	10
H3	10

(۱۱) نتایج مربوط به آنالیز کیفی نمک‌های محلول در آب نشان می‌دهد در خشت‌های حاکم‌نشین که از میزان نمک بیشتری برخوردارند، مقاومت فشاری کاهش یافته است. جدا از کاسته شدن درصد رس، یکی از دلایل اصلی بروز این مسئله را می‌توان به ایجاد تخلخل ناشی از

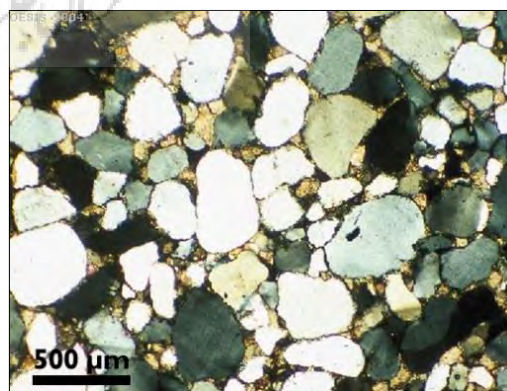
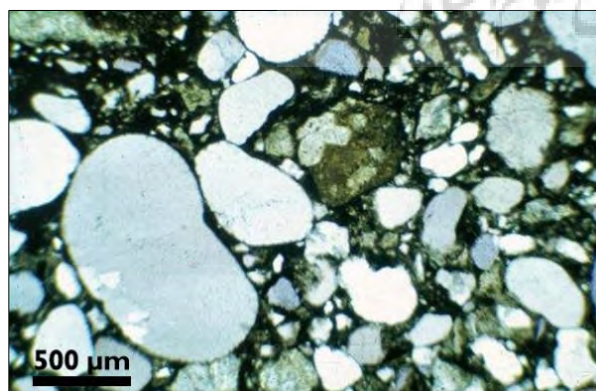
جدول ۱۴: آنالیز کیفی نمک‌های محلول در آب و کربنات‌ها

Table 14: Qualitative analysis of the soluble salts in water and carbonates

کد نمونه Sample code	سولفات Sulfate	کلرید Chloride	کربنات Carbonate
B1	+	+	+
B2	+	+	++
B3	+	+	+
H1	++	+++	+
H2	++	++	+
H3	++	+++	+

+ Availability of ion  
 ++ Considerable availability of ion  
 +++ Availability of ion as the main ingredient

حضور یون  
 حضور یون در حد قابل توجه  
 حضور یون به عنوان جزء اصلی سازنده



اشکال ۸ و ۹: مطالعه میکروسکوپی دانه‌بندی<sup>۲</sup> خشت‌ها  
 Figs; 8, 9: Microscopic studies of the adobes granulation

پتانسیل تورم نیز با استناد به اندیکس خمیری، دست‌کم در خشت‌های نمونه‌برداری شده ناچیز است (جدول ۱۶- Table 16). از این نظر، هم خشت‌های بارو (حصار) و هم خشت‌های حاکم‌نشین در وضعیت نسبتاً مشابهی قرار دارند.

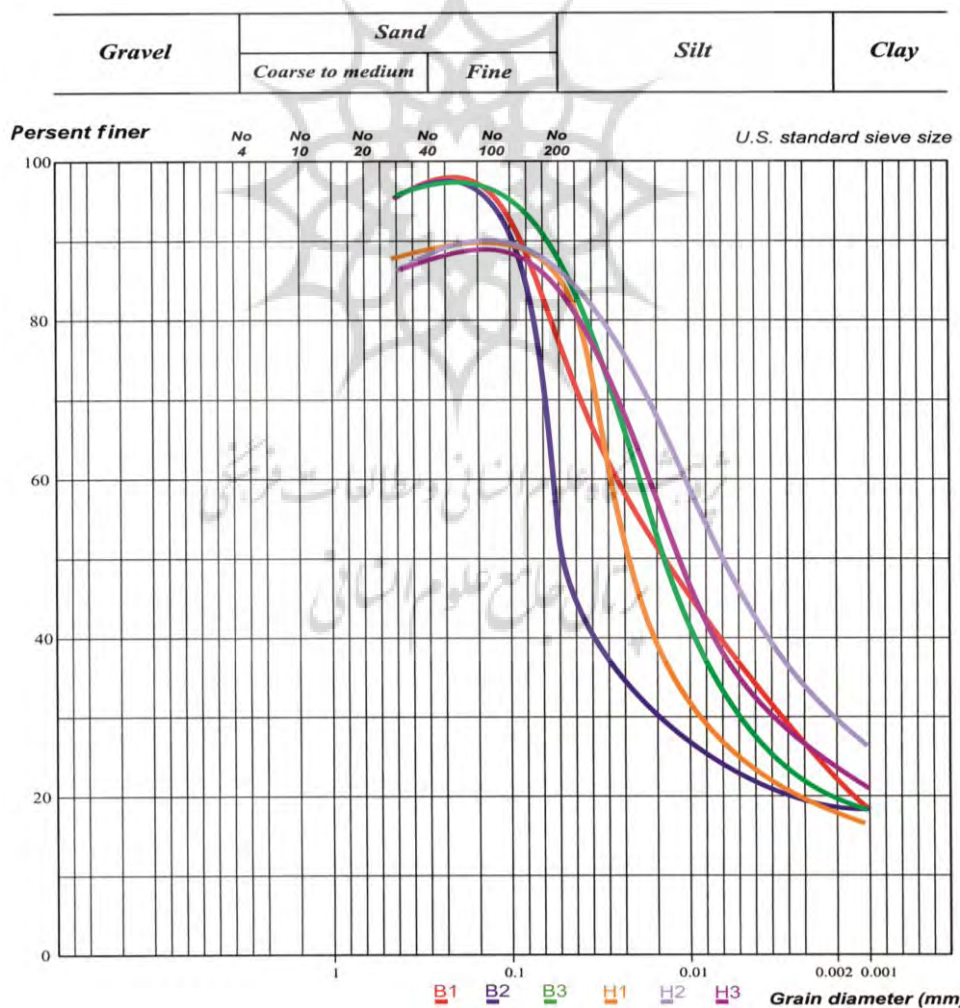
هستند و دانه‌های زاویه‌دار با گوشه‌های شکسته و صیقل نیافته درصد ناچیزی از ذرات خاک را شامل می‌شوند. با توجه به اینکه چنین وضعیتی غالباً در خاک‌های رودخانه‌ای مشاهده می‌شود، لذا محتمل است که بیشتر از همین ذخایر خاک (رودخانه‌ای) برای ساخت خشت‌ها استفاده شده باشد (اشکال ۹ و ۸-9، Figs).

۱۴) نتایج مربوط به اندازه‌گیری حدود آتبرگ و دانه‌بندی به‌روش الک و هیدرومتری برای خشت‌ها نشان می‌دهد که در همه‌ی نمونه‌ها درصد ذرات رس (کوچک‌تر از ۲ میکرون) بسیار اندک است و در عوض، مقدار زیادی ماسه وجود دارد (جدول ۱۵- Table 15). به تعبیر دیگر، بخش غیر ماسه‌ای خشت‌ها را بیشتر ریزدانه‌های سیلت شامل می‌شوند (شکل ۱۰- Fig 10).

جدول ۱۵: اندازه‌گیری حدود آتبرگ

Table 15: Measurement of the Atterberg limits

کد نمونه Sample code	درصد حد روانی Liquid limit	درصد حد خمیری Plastic limit	اندیکس خمیری Plastic index
B1	33.31	26.78	6.53
B2	31.77	25.97	5.8
B3	32.09	26.06	6.03
H1	27.59	22.35	5.24
H2	26.20	20.19	6.01



شکل ۱۰: دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری برای نمونه‌های مورد مطالعه

Fig: 10: Grading by sieve and hydrometric method for the studied samples

جدول ۱۶: طبقه‌بندی پتانسیل تورم با نشانه خمیری [10]

Table 16: Classification of the inflation potential by the plastic index

Plastic index	نشانه خمیری	Inflation potential	پتانسیل تورم
Low	پائین	0-15	
Medium	متوسط	10-35	
High	زیاد	20-55	
Very high	خیلی زیاد	بیش از ۳۵	More than 35

خاصیت شکل‌پذیری فوق‌العاده‌ای دارند و همین ویژگی، بارزترین خصلت آن‌ها است. کانی‌های رسی شناسایی شده در خشت‌های ارگ بم، بیشتر از خانواده ایلیت هستند. این کانی‌ها نسبت به کائولینیت‌ها از کیفیت پایین‌تری برخوردارند و قابلیت جذب آب بیشتری دارند، بنابراین در چرخه‌های تر و خشک شدن می‌توانند متحمل آسیب‌های بیشتری گردند (جدول ۱۹-19). ایلیت‌ها اما قدرت بادکردگی (تورم) یکسانی از خود نشان نمی‌دهند. برخی مانند ورمیکولیت، توان بادکردگی قابل‌ملاحظه‌ای دارند اما گروهی دیگر مثل ایلیت، شبکه ثابتی دارند و قادر به تثبیت آب یا کاتیون‌ها در فواصل خود نیستند. به‌طور کلی تمایل به جذب آب و تورم در مونتموریلونیت‌ها بیشتر از ایلیت‌ها و در ایلیت‌ها بیشتر از کائولینیت‌ها است. مونتموریلونیت‌ها حتی می‌توانند پس از خشک شدن، مجدداً رطوبت هوا را جذب کنند و باعث تورم مصالح گردند. تکرار این‌گونه چرخه‌های تر و خشک شدن، از جمله مهم‌ترین عوامل تخریب مصالح گلی است [10,13].

(۱۵) بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، اجزاء اصلی خشت‌ها را کوارتز و کلسیت تشکیل داده و فلدسپات‌ها و کانی‌های رسی به میزان نه‌چندان قابل‌توجهی در نمونه‌ها یافت می‌شوند. وجه اشتراک نتایج کانی‌شناسی در این است که غالب خشت‌ها از نظر مقدار کانی‌های رسی مرغوب، فقیر نشان می‌دهند (جداول ۱۷ و ۱۸ Tables 17,18). پیش‌تر وجود کانی‌های گروه کائولینیت، ایلیت و مونتموریلونیت در خشت‌های ارگ بم شناسایی شده است. هماتیت، مگنتیت و پیروکسن که حضور آن‌ها در نمونه خشت‌های مورد آزمون محرز گردیده، کانی‌هایی هستند که بر رفتار مکانیکی خاک تأثیر فوق‌العاده‌ای ندارند. به‌عکس، کانی‌های رسی، ساختمان خشت را کاملاً دستخوش تغییر می‌سازند البته در مقادیری که از عهده تغییر برآیند. جدا از دانه‌بندی مناسب، دلیل مرغوبیت نسبی معدودی از نمونه‌ها را می‌توان به حضور کانی‌های رسی باکیفیتی مثل کانی‌های گروه کائولینیت نسبت داد. کائولینیت‌ها بسیار ریزدانه هستند، به‌طوری که گاه اندازه ۹۰٪ ذرات آن‌ها کمتر از یک میکرون است و از این‌رو

جدول ۱۷: تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRD

Table 17: Adjustment of the chemical components by XRD method

B1: ترکیب شیمیایی کد نمونه	B2: ترکیب شیمیایی کد نمونه	H1: ترکیب شیمیایی کد نمونه	H2: ترکیب شیمیایی کد نمونه
Chemical components of the sample code: B1	Chemical components of the sample code: B2	Chemical components of the sample code: H1	Chemical components of the sample code: H2
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	Quartz (SiO <sub>2</sub> )	Quartz (SiO <sub>2</sub> )	Quartz (SiO <sub>2</sub> )
Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )
Feldspar (Na.Ca)	Feldspar (Na.Ca)	Feldspar (Na.Ca)	Feldspar (Na.Ca)
Feldspar (K)	Feldspar (K)	Feldspar (K)	Feldspar (K)
Clay Mineral	Clay Mineral	Clay Mineral	Clay Mineral
Pyroxene	Pyroxene	Pyroxene	Pyroxene
Hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Minore	Hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Minore	Hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Minore	Hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Minore
Magnetite (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) Minore	Magnetite (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) Minore	Magnetite (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) Minore	Magnetite (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) Minore
		Anhydrite (CaSo4)	

جدول ۱۸: تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF

Table 18: Adjustment of the chemical components by XRF method

ترکیب شیمیایی Chemical material	B1 درصد وزنی کد نمونه : Weight percentage of the sample code: B1	B2 درصد وزنی کد نمونه : Weight percentage of the sample code: B2	H1: درصد وزنی کد نمونه : Weight percentage of the sample code: H1	H2: درصد وزنی کد نمونه : Weight percentage of the sample code: H2
Na <sub>2</sub> O	1.0	1.1	1.2	1.1
MgO	3.3	3.2	3.5	3.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.1	14.3	13.4	13.9
SiO <sub>2</sub>	51.4	52.3	48.3	50.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.22	0.34	0.33
SO <sub>3</sub>	0.18	0.18	1.0	0.67
Cl	0.12	0.12	0.98	0.29
K <sub>2</sub> O	4.0	3.8	5.0	5.0
CaO	9.1	9.3	10.0	9.1
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.57	0.52	0.54
MnO	0.11	0.14	0.11	0.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.5	6.52	7.4	7.3
L.O.I	8.27	8.25	8.25	8.20
La & Lu	<1	<1	<1	<1

جدول ۱۹: انقباض خطی خشک شدن کانی‌های رسی به درصد [Archive of the base of Arg-e Bam and its cultural landscape]

Table 19: Linear drying shrinkage of the clay minerals in percentage

Kaolinite کائولینیت	3-10%
Illite ایلیت	4-11%
Montmorillonite مونت‌موریلونیت	12-23%

## ۷. نتیجه‌گیری

پهن‌بیکر مربوط به حصار پیرامونی ارگ است. خشت‌های استفاده‌شده در طاق‌ها، کوچک‌تر و باریک‌تر انتخاب شده‌اند که شاید تدبیری بوده برای سبک‌تر ساختن آن‌ها. تعمیرات پی‌درپی تا پیش از زلزله، طیفی از خشت‌های جورواجور را بی‌هیچ حسابی در کنار یکدیگر قرار داده است. جدا از چفت‌وبست نامناسب که محصول چین شیوه‌ی پرخطرهای برای دیوارچینی‌ها است، باید منتظر رفتارهای متفاوت از هرکدام در برابر تنش‌های وارده باشیم. ۱۳ نمونه ماده پرکننده در ترکیب خشت‌ها شناسایی شده که در این میان، گاه، خرده‌سنگ و شن ریزه عمومیت بیشتری دارند، هرچند نشانی از این نیست که به‌عنوان یک ماده افزودنی با عملکرد خاص و به‌قصد بهبود خصوصیات رفتاری مصالح مورد استفاده قرار گرفته باشند. در بحث فن‌شناسی، نتایج حاصل از مطالعه و بررسی الگوهای ترک‌خوردگی و فرسایش، توزیع دانه‌بندی، توزیع اجزای ساختاری، ترکیب شیمیایی، درصد رطوبت، دامنه‌ی انقباض و کشش موئینگی نمونه‌های

با شناختی که از رفتار مصالح در محوطه ارگ به‌دست آمده، قابل‌درک است که مرمت و بازسازی نواحی موردنظر ارگ بم با تکیه بر همان مصالح، توفیقی به دنبال نخواهد داشت و قدمی روبه‌جلو نخواهد بود. چنانچه برای برطرف نمودن ضعف‌های موجود و بهبود خصوصیات رفتاری خشت‌های مصرفی تدبیری نشود، عملاً اقدامات مرمتی با چالش جدی مواجه خواهند شد. این مهم‌انگه اهمیت و ضرورت خود را نشان می‌دهد که به نتایج حاصل از مطالعات انجام‌گرفته بر روی نمونه خشت‌های تاریخی ارگ بم رجوع شود. از بین بالغ‌بر ۵ هزار نمونه خشت موردبررسی در بحث گونه‌شناسی، تنها حدود یک‌چهارم خشت‌ها خصوصیات ساختمانی مناسبی در بعد ماکروسکوپی (با محور قرار دادن سه شاخص بررسی یعنی استحکام سطحی، دانه‌بندی و تخلخل) از خود نشان دادند. بیش از نیمی از خشت‌ها دارای ابعاد متوسط (حدود ۲۳×۲۳×۵cm) هستند و بیشترین فراوانی خشت‌های

داریم، متصور است که می‌توان با نوآوری در فرایند تولید و کاربرد مصالح گلین (خشت و ملات) موجب بهبود خصوصیات رفتاری خشت‌های جدید و ملات مورد مصرف برای اقدامات حفاظتی و مرمتی ارگ گردید. این درواقع همان فرضیه تحقیق است. علی‌رغم تمام این نکات، شاید چندان منصفانه نباشد که خشت‌های ارگ بم را صرفاً بر اساس نتایج آزمایشگاهی و در مقیاس استانداردهای رایج، ارزیابی و قضاوت کنیم. یقیناً ضعف‌های مشهود در خشت‌های این مجموعه تاریخی، اندک نیستند، کم‌اهمیت هم نیستند، اما هرچه باشد ماندگاری و سازگاری قابل‌تحسین خود را طی سالیان دراز در کنار آمدن با طبیعت خشن منطقه به شکل اعجاب‌آوری نشان داده‌اند.

### پی‌نوشت‌ها

- این فن تزئین شامل خمیر نازکی از گل رس بود که از سوراخ کیسه‌ای با فشار به شکل خطوط و مارپیچ روی ظرف نهاده می‌شد همانند کاری که شیرینی‌سازان امروز برای ساختن گل‌های روی کیک به کار می‌برند.
- این تصاویر با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان دوچشمی مدل Games Swift با نور متقاطع XPL گرفته شده‌اند. تصویر سمت راست، متشکل از قطعات فراوان کانی کوارتز و مربوط به رسوبات رودخانه‌ای است که به دلیل جابجایی زیاد از منشأ اولیه دارای لبه‌های گرد تا نیم‌گرد شده هستند. در حفاصل قطعات بزرگ، ریزدانه‌های کوارتز جای گرفته که توسط سیمان سیلیسی به یکدیگر چسبیده‌اند. تصویر سمت چپ نیز متشکل از قطعات فراوان کوارتز است که به صورت ناهمگن در کنار هم دیده می‌شوند. اندازه این قطعات از ۰/۵ mm تا چند میکرون متغیر است.

### References

- Nejati M. Technical and engineering activities in the recovery project of Bam's cultural heritage. Annals Res. Rep. Recover. Proj. Bam, Tehran: Resaneh Pardaz and Research Base of Bam; 2008, p. 19–38. [in Persian]  
[نجاتی محمود. فعالیت‌های فنی و مهندسی در پروژه نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم. سالنامه پژوهشی پروژه

مورد آزمون، هرچند خیلی پر اختلاف نشان نمی‌دهند اما آن‌قدر شواهد و علائم دال بر تمایز باقی گذاشته‌اند که دریابیم از ذخایر نسبتاً متعدد خاک البته در یک محدوده جغرافیائی نه‌چندان وسیع استفاده شده است. به‌طور کلی، ویژگی‌های ساختمانی خشت‌های هم‌گروه (که از یک محل خاص نمونه‌گیری شده‌اند) قرابت مشهودی نسبت به هم نشان می‌دهند. این قرابت در مورد خشت‌های غیر هم‌گروه (که از محل‌های متفاوت ارگ برداشت شده‌اند) چندان به چشم نمی‌آید. این مسئله به‌نوعی می‌تواند به تعدد دوره‌های معماری و مرمتی ارگ تعبیر شود. وجود ناخالصی‌های زیاد، گویای این واقعیت است که فرایند آماده‌سازی خاک و عمل‌آوری گل به‌خوبی انجام نشده است. تخلخل و میزان نمک زیاد و ایضاً جایگزین شدن سیلت به‌جای رس از عوامل مؤثر افت مقاومت فشاری گروهی از خشت‌ها هستند. جدا از اینکه غالب خشت‌ها (به‌استثنای خشت‌های بارو) مقاومت فشاری پائینی دارند، اختلاف و نوسان زیاد مقاومت فشاری و حتی مقاومت خمشی نمونه‌ها، تهدیدی برای محوطه خواهد بود. اجزاء اصلی خشت‌ها را کوارتز و کلسیت تشکیل داده و عناصر اصلی یعنی فلدسپات‌ها و کانی‌های رسی مرغوب به میزان قابل‌اطمینانی در نمونه‌ها یافت نمی‌شوند. کانی‌های رسی موجود، بیشتر از خانواده ایلیت هستند که از کیفیت متوسطی برخوردار می‌باشند.

نتایج حاصل از مطالعه خصوصیات ساختمانی خشت‌های ارگ بم کمک خواهند کرد تا برای مرمت‌های قابل‌اطمینان به مصالحی برسیم که ضعف خشت‌های گذشته را نداشته باشند و یا اینکه ضعف‌هایشان به حداقل ممکن رسیده باشد. حتی می‌توان به تولید خشت‌های جدید با رفتارهای مکانیکی ارتقاء یافته اندیشید. با شناختی که اکنون از وضعیت مصالح خشتی ارگ بم

نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم، تهران: رسانه‌پرداز و پایگاه پژوهشی بم؛ ۱۳۸۷، ص. ۳۸–۱۹.]

- Karimi A. Arg-e Bam architecture and state of the Silk. In: Ayatollahzadeh Shirazi B, editor. Proc. Second Congr. Hist. Iran. Archit. Urban. Arg-e Bam Kerman, Tehran: Iranian Cultural Heritage Organization; 2003, p. 241–70. [in

- Persian]  
[کریمی اصغر. معماری ارگ بم و وضعیت ابریشم. به  
کوشش آیت‌الله‌زاده شیرازی باقر، ویراستار. مجموعه  
مقالات دومین کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران،  
ارگ بم کرمان، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور؛  
۱۳۷۸، ص. ۲۷۰-۲۴۱.]
- [3] Adle C. Qanats of Bam from the archaeological prospect, irrigation system in Bam and its development from the Prehistoric to the modern era. In: Ayatollahzadeh Shirazi B, editor. Proc. third Congr. Hist. Iran. Archit. Urban. Arg-e Bam Kerman, vol. 7, Tehran: Iranian Cultural Heritage Organization; 2007, p. 47-125. [in Persian]  
[عدل شهریار. قنات‌های بم از منظر باستان‌شناسی،  
سیستم آبیاری در بم و پیدایش و تکامل آن از عهد پیش  
از تاریخ تا دوران مدرن. به کوشش آیت‌الله‌زاده شیرازی  
باقر، ویراستار. مجموعه مقالات سومین کنگره تاریخ  
معماری و شهرسازی ایران، ارگ بم کرمان، جلد ۷،  
تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور؛ ۱۳۸۶، ص.  
۱۲۵-۴۷.]
- [4] Ahmadi N. Archaeological studies on the Arg-e Bam site based on the statistics of the findings. Annals Res. Rep. Recover. Proj. Bam, Tehran: Resaneh Pardaz and Research Base of Bam; 2008, p. 63-74. [in Persian]  
[احمدی نرگس. مطالعات باستان‌شناسی آواربرداری  
محوطه ارگ بم بر اساس تحلیل آماری یافته‌ها. سالنامه  
پژوهشی پروژه نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم، تهران:  
رسانه‌پرداز و پایگاه پژوهشی بم؛ ۱۳۸۷، ص. ۷۴-۶۳.]
- [5] Adle C, Ebrahimi A, Joodaki Azizi A, Zare S, Ataie MT, Fazel L. Establishing a scientific method for the absolute dating of mud-bricks and stratume. 12th Annu. Archaeol. Conf. Iran, May 19th-21st, Tehran: Institute of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism; 2014. [in Persian]  
[عدل شهریار، ابراهیمی افشین، جودکی عزیزی اسدالله،  
زارع شهرام، عطایی محمدتقی، فاضل لیلا. پایه‌گذاری  
روش علمی برای تاریخ‌گذاری مطلق خشت و چینه.  
دوازدهمین گردهم‌آیی سالانه‌ی باستان‌شناسی ایران، ۲۹  
تا ۳۱ اردیبهشت، تهران: پژوهشگاه سازمان میراث  
فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری؛ ۱۳۹۳.]
- [6] Bastani Parizi ME. Arg-e Bam. Kerman: Kerman Culture Administration; 1958. [in Persian]  
[باستانی پاریزی محمد ابراهیم. ارگ بم. کرمان:  
انتشارات اداره فرهنگ کرمان؛ ۱۳۳۷.]
- [7] Noorbakhsh H et al. Arg-e Bam. Tehran: Tahoori; 1976. [in Persian]  
[نوربخش حمید و دیگران. ارگ بم. تهران: طهوری؛  
۱۳۵۵.]
- [8] Gaube H. Arg-e Bam. Kerman in Territory of the Iranian Studies. Translated by Afsar K. Kerman: Kerman Study centre; 1991. [in Persian]  
[گوبه هاینس. ارگ بم. کرمان در قلمرو تحقیقات ایرانی.  
ترجمه افسر کرامت‌الله. کرمان: انتشارات مرکز کرمان  
شناسی؛ ۱۳۷۰.]
- [9] Beheshti SM. Bam earthquake, Earthquake in the minds of Iranians. Annals Res. Rep. Recover. Proj. Bam, Tehran: Resaneh Pardaz and Research Base of Bam; 2005, p. 8-9. [in Persian]  
[بهشتی سید محمد. زلزله بم، زلزله‌ای در ذهن ایرانیان.  
سالنامه پژوهشی پروژه نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم،  
تهران: رسانه‌پرداز و پایگاه پژوهشی بم؛ ۱۳۸۴، ص.  
۹۰۸.]
- [10] Askari F. Inflation and Divergence of the Soils. Tehran: Jahad-e Daneshgahi-e; 1993. [in Persian]  
[عسکری فرج‌الله. تورم و واگرایی خاک‌ها. تهران:  
انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران؛ ۱۳۷۲.]
- [11] Esrafilii A, Ejraii S, Rasekh N, Hadiyan M. Classification and laboratory studies of the adobes of the [in Persian]Arg-e Bam's tower number one. Annals Res. Rep. Recover. Proj. Bam, Tehran: Resaneh Pardaz and Research Base of Bam; 2005, p. 117-22. [in Persian]  
[اسرافیلی آزاد، اجرایی صامت، راسخ نسیم و هادیان  
منیژه. طبقه‌بندی و مطالعات آزمایشگاهی خشت‌های  
ارگ بم (برج شماره یک). سالنامه پژوهشی پروژه  
نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم، تهران: رسانه‌پرداز و  
پایگاه پژوهشی بم؛ ۱۳۸۴، ص. ۱۱۷-۱۲۲.]
- [12] Rasekh N. Classification and laboratory studies of the adobes of the Arg-e Bam's Jame' mosque. Annals Res. Rep. Recover. Proj. Bam, Tehran: Resaneh Pardaz and Research Base of Bam; 2009, p. 187-98. [in Persian]  
[راسخ نسیم. طبقه‌بندی و مطالعات آزمایشگاهی  
خشت‌های مسجد جامع ارگ بم. سالنامه پژوهشی پروژه  
نجات‌بخشی میراث فرهنگی بم، تهران: رسانه‌پرداز و  
پایگاه پژوهشی بم؛ ۱۳۸۷، ص. ۱۸۷-۱۹۸.]
- [13] Vafaeian M. Soil Engineering Properties. Tehran: Arkan Publications; 1997. [in Persian]  
[وفائیان محمود. خواص مهندسی خاک. تهران: نشر  
ارکان؛ ۱۳۷۶.]



