Journal of Research on
ARCHAEOMETRY
A Peer-Reviewed Academic Journal of Archaeological and Conservation Science Studies

Tabriz Islamic Art University

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

Research Paper

Structural Study and Chemical Composition Analysis of the Historical Adobe from the Surviving Architectural Structures in the Borj-e Afghan Region of Sistan

Masoud Bater*[1], Mahtab Rostampour[2]

1. Assistant Professor, Faculty of Art, University of Birjand, Birjand, Iran
2. BA degree of conservation & restoration of Cultural Properties, University of Zabol, Zabol, Iran
* Correspondence: masoud.bater@birjand.ac.ir

Abstract

Mudbrick and earthen architecture in the Middle East, particularly in Iran, has a long-standing tradition and remarkable continuity due to the arid climate and the abundance of soil sediments. Archaeological evidence from eastern and southeastern Iran, including the Sistan region and sites such as Shahr-e Sukhteh, Dahaneh-ye Gholaman, and Old Zahedan (Zahedan-e Kohneh), demonstrates the persistence of this technology from prehistoric times through the Islamic periods. Despite this extensive background, detailed laboratory studies on the materials of historical mudbrick and earthen buildings in this region remain limited.The aim of this research is to identify the structure and determine the chemical composition of historical mudbricks from the Islamic period in the rabad area of Zahedan-e Kohneh, in order to provide a scientific basis for assessing material conditions and supporting conservation and restoration decision-making for earthen architecture. To this end, a set of historical mudbrick samples from the Afghan Tower area was examined using standard laboratory techniques, including X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), titration analysis, and gravimetric determination of sulfate content.The results indicate that the mudbricks were produced from local, alluvial, and heterogeneous soils with a clay–siliceous composition containing carbonate and gypsum lenses. The presence of mineral phases such as quartz, feldspars, calcite, dolomite, muscovite, and montmorillonite, together with a wide dispersion of calcium carbonate (9–40.5%) and calcium sulfate (0.26–1.4%), reflects the heterogeneity of the original material composition and the potential reactivity of the materials in response to moisture and salt-related factors.The findings underscore the necessity of considering conservation constraints and conducting supplementary investigations and tests prior to any consolidation interventions. By providing chemical and mineralogical data, this study establishes a preliminary framework for the scientific support of conservation and restoration decision-making for earthen buildings in the region and highlights the critical role of material composition analysis in evaluating their stability conditions.

Keywords: Earthen materials, Mudbrick, Sistan, Zahedan-e Kohneh, Borj-e Afghan Region, Conservation and Restoration of Earthen Architecture, Material Archaeometry.

Received: 2025/09/27
Revised: 2025/12/20
Accepted: 2025/12/29
Published: 2025/12/30

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

Introduction

The Sistan and Baluchestan region, located in southeast of Iran, represents one of the oldest centers of earthen architecture in the country, primarily because of its hot and arid climate and widespread abundance of suitable earthen materials. The use of mudbrick and earth in this region can be traced from the prehistoric period at Shahr-e Sukhteh through historical and Islamic periods, as demonstrated by prominent sites such as Dahan-e Gholaman, Kuh-e Khajeh, and Zahidan-e Kohneh. The archaeological site of Zahidan-e Kohneh represents one of the most significant

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

and extensive Islamic era settlements in the Sistan Plain, with its rabad (suburban zone) encompassing a broad area. Within this zone, numerous remains of mudbrick architecture and a diverse assemblage of archaeological materials have been identified, indicating the continuity of settlement and architectural activity across the region. The mudbrick samples examined in the present study were collected from this area and subjected to detailed laboratory analyses in order to identify the soil structure, chemical composition, and mineralogical characteristics of these historical materials.

Methodology

A total of thirty-two historic adoe samples were collected from the collapsed architectural remains in the Borj-e Afghan area, located near the archaeological zone of Bibi-Doust within the historic city of Zahedan-e Kohneh in the Sistan plain. These specimens belong to the Islamic period and represent the rabad (suburban zone) of the ancient settlement. From this assemblage, eight samples were randomly selected for laboratory examination, of which six were ultimately subjected to instrumental analyses.The adobe are generally large in size and occur in both rectangular and square forms, ranging from 32 × 15 cm to 42 × 42 cm. Their colors vary from light earthen tones to brownish-grey. The fabric of the bricks is reinforced with straw fibers as well as sand and silt particles to prevent cracking during the drying process. Comparative assessments show that the dimensions, morphology, and structural characteristics of these adobes closely correspond to architectural mud-bricks of the Ilkhanid and Timurid periods. This interpretation is consistent with broader archaeological evidence from the Sistan region and with the typological analysis of ceramics recovered from Zahedan-e Kohneh and Borj-e Afghan, which collectively date these specimens to the late medieval Islamic centuries (7th–9th A.H.). For analytical purposes, all samples were first photographed and visually examined using macroscopic and microscopic methods to document their external morphology and internal texture. Sub-samples were then extracted from the adobe bodies for chemical and mineralogical analyses. Chemical characterization was performed using classical wet-chemistry procedures to determine calcium carbonate and calcium sulfate contents through titration and gravimetric methods. Mineral phases were identified through X-ray diffraction (XRD), and the elemental composition of the samples was measured using X-ray fluorescence (XRF). Together, these analytical techniques provided detailed insights into the structural, mineralogical, and chemical properties of the historic bricks, enabling evaluation of their durability, mechanical behavior, and comparative association with mud-bricks from other historical periods in Iran.

Results

The analyses conducted on historical mudbricks recovered from the Borj-e Afghan area in the Sistan region indicate considerable variability in terms of shape, dimensions, and structural characteristics. The bricks were produced mainly in two principal forms—rectangular and square—with relatively large dimensions. Despite their considerable age, most samples exhibit adequate cohesion.Measurements of calcium sulfate content yielded values ranging from 0.26% to 1.40%, with an average of approximately1.02%.Titration analyses of calcium carbonate revealed a wide range of values, from 9% to 40.5%. X-ray fluorescence (XRF) results indicate that the chemical composition of the mudbricks is dominated by SiO_2, CaO, and Al_2O_3. The elemental ratios of SiO_2/Al_2O_3 and SiO_2/CaO were also determined. X-ray diffraction (XRD) analyses identified the presence of quartz, feldspars, calcite, dolomite, and a diverse assemblage of clay minerals, including muscovite, clinochlore, and montmorillonite.

Discussion

The variability in shape and dimensions reflects the traditional and largely non-standardized nature of mudbrick production in the region. The adequate cohesion observed in most samples suggests acceptable quality of raw materials and effective traditional manufacturing techniques. The incorporation of straw fibers along with sand and gravel within the brick matrix likely played a significant role in reducing shrinkage, preventing cracking, and enhancing dimensional stability.

Comparative analyses of brick dimensions and macroscopic characteristics reveal a high degree of conformity with architectural standards of the middle Islamic periods, particularly the Ilkhanid and Timurid eras, consistent with archaeological and ceramic evidence documented for the region.The measured calcium sulfate values indicate semi-critical but manageable conditions regarding salt presence. These results suggest the influence of capillary rise and limited sulfate migration, emphasizing the necessity of controlling moisture and water ingress pathways in future conservation strategies.The wide range of calcium carbonate content reflects the heterogeneity of the original soil sources and the traditional, uncontrolled production processes. Although higher $CaCO_3$ contents may increase initial cohesion and matrix hardness, under moisture exposure they may also induce lime-related

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

stresses and microcrack formation.The dominance of SiO_2, CaO, and Al_2O_3 suggests a favorable balance between mechanical strength, workability, and chemical reactivity. The mineralogical composition confirms the use of alluvial carbonate soils. Among the identified clay minerals, montmorillonite, as a swelling clay mineral, represents a primary factor contributing to vulnerability under wet–dry cycling conditions.Overall, the durability behavior of the historical mudbricks appears to be governed mainly by mineralogical composition, the silica-to-carbonate ratio, and ambient moisture conditions. Therefore, future conservation and restoration strategies should prioritize moisture control, salt management, and the use of materials compatible with the original mudbrick composition.

Conclusion

The results of this study, based on XRD and XRF analyses and loss on ignition (LOI) measurements conducted on historical mudbricks recovered from the Borj-e Afghan site in the Sistan Plain, enabled a detailed identification of the mineralogical and chemical composition of the raw materials used in their manufacture. X-ray diffraction data revealed the presence of major mineral phases, including Quartz, Feldspars, Calcite, Dolomite, Muscovite, Clinochlore, and Montmorillonite, indicating the use of natural soils with a clay silt composition and an alluvial origin.XRF analyses further confirmed the dominance of SiO_2 and CaO in the chemical composition of the samples, in agreement with the mineralogical results, and reflecting the significant contribution of silicate and carbonate phases to the mudbrick matrix. The variable calcium carbonate content, ranging from 9% to 40%, together with the presence of calcium sulfate in low to moderate amounts (0.26–1.4%), points to the heterogeneity of the original soil materials employed in mudbrick production. The LOI results corroborate this compositional variability in terms of volatile and carbonate components.Overall, the findings indicate that the historical mudbricks from the Borj-e Afghan area were produced with minimal processing and directly from local soil resources, and that the observed variations in their chemical and mineralogical composition reflect the natural heterogeneity of the alluvial deposits of the Sistan Plain. By providing a coherent and well documented dataset of chemical and mineralogical characteristics, this study establishes a reliable baseline for understanding the raw materials of historical mudbricks in the region and may serve as a reference framework for future comparative studies on historical earthen architecture in other parts of Iran.

Author Contributions: The first author: has made the greatest contribution to the writing, research, and editing of this article, including: idea generation, research methodology, research and review, study of concepts and article design, data collection and analysis, preparation of the original version, and editing the article structure. The second author: has been responsible for data management and collection, data visualization, administrative follow-up, and conducting some studies and experiments.

Funding: This research has not received any domestic or foreign funding.

Data Availability Statement: The dataset is available from the authors upon request..

Acknowledgments: The authors of this article consider it necessary to thank and appreciate the cooperation of the former director of the Department of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts of Zabol City, Mr. Eng. Keykha Aria. In addition, the assistance and help of our esteemed colleague, Mr. Eng. Reza Khanjari, a member of the faculty of Zabol University, is sincerely appreciated.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest..

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

پژوهه باستان‌سنجی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز

مقاله پژوهشی

ممطالعه ساختاری و ترکیب شیمیایی خشت‌های تاریخی ساختارهای معماری بجای مانده در منطقه برج افغان سیستان

مسعود باتر[1*]، مهتاب رستم‌پور[2]

۱. استادیار، دانشکدهٔ هنر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲. دانش‌آموختهٔ رشتهٔ مرمت آثار تاریخی، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه زابل، زابل، ایران
* مسئول مکاتبات: masoud.bater@birjand.ac.ir

چکیده

معماری خشت و گلی در خاورمیانه، به‌ویژه ایران، به‌دلیل اقلیم خشک و فراوانی رسوبات خاکی، سابقه‌ای کهن و تداومی طولانی دارد. شواهد باستان‌شناختی در شرق و جنوب شرق ایران، از جمله منطقهٔ سیستان و محوطه‌هایی چون شهر سوخته، دهانهٔ غلامان و زاهدان کهنه، استمرار این فناوری را از پیش از تاریخ تا دوره‌های اسلامی نشان می‌دهد. با وجود این پیشینه، مطالعات آزمایشگاهی دقیق بر مصالح خشت و گلی بناهای تاریخی این منطقه محدود است. هدف این پژوهش، شناسایی ساختار و تعیین ترکیب شیمیایی خشت‌های تاریخی دوران اسلامی منطقهٔ ربض شهر زاهدان کهنه، به منظور فراهم‌سازی مبنایی علمی برای بررسی شرایط مصالح و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های حفاظت و مرمت بناهای خشتی است. بدین منظور، مجموعه‌ای از خشت‌های تاریخی محدودهٔ برج افغان با روش‌های آزمایشگاهی استاندارد شامل فلورسانس پرتوی ایکس (XRF)، پراش پرتوی ایکس (XRD)، آزمون تیتراسیون و سنجش درصد سولفات به روش وزن‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد خشت‌ها از خاک محلی، آبرفتی و ناهمگن با ترکیب رسی–سیلیسی و عدسی‌های کربناته و ژیپسی ساخته شده‌اند. حضور فازهایی چون کوارتز، فلدسپات‌ها، کلسیت، دولومیت، مسکوویت و مونت‌موریلونیت، همراه با پراکنش گسترده کربنات کلسیم (۹ تا ۴۰٫۵٪) و سولفات کلسیم (۰٫۲۶ تا ۱٫۴٪)، بیانگر ناهمگنی ترکیب اولیه و پتانسیل واکنش‌پذیری مصالح در برابر عوامل رطوبتی و نمکی است. یافته‌ها بر لزوم توجه به ملاحظات حفاظتی و انجام بررسی‌ها و آزمون‌های تکمیلی پیش از هرگونه اقدام تحکیمی دلالت دارد. این مطالعه با ارائهٔ داده‌های شیمیایی و کانی‌شناسی، چارچوبی مقدماتی برای پشتیبانی علمی از تصمیم‌گیری‌های حفاظت و مرمت بناهای خشتی منطقه فراهم می‌کند و نقش شناخت ترکیب مصالح را در ارزیابی شرایط پایداری آن‌ها برجسته می‌سازد.

دریافت: ۱۴۰۴/۷/۵
آخرین اصلاح: ۱۴۰۴/۹/۲۹
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۸
انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۹

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

واژگان کلیدی: مصالح خاکی، خشت، سیستان، زاهدان کهنه، منطقه برج افغان، حفاظت و مرمت بناهای خشتی، باستان‌سنجی مصالح

۱. مقدمه

بر پایهٔ شواهد باستان‌شناسی، استفاده از خاک و مواد رسی در ساخت‌وساز از دوران نوسنگی در مراکز شکل‌گیری تمدن‌های اولیه رواج یافت، هرچند پیش از آن نیز انسان‌های شکارچی در پناهگاه‌های نیمه‌دائمی خود از اندودهای گلی استفاده می‌کردند؛ نمونه‌هایی از این شیوه در «اولدووای» تانزانیا و «مولدووا» اوکراین شناسایی شده است (Houben, 1994:8; Demay et al., 2012) . در خاورمیانه، از عصر نوسنگی به بعد، معماری خشتی گسترش یافت و در شهر باستانی «جریکو» (حدود ۸۰۰۰ ق.م) بناهایی مدور و بیضی با دیوارهای خشت و گل ساخته شدند (Houben & Guillaud, 1994:8؛ مجیدزاده، ۱۳۷۶؛ گاردنر، ۱۳۸۷). همزمان، در محوطه‌هایی چون «موری‌بیت» در سوریه و «حسونا» در عراق، خانه‌های چهارگوش خشتی و سازه‌های چینه‌ای با کف‌های کاهگلی

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

شکل گرفتند (مجیدزاده، ۱۳۷۶؛ فرنو، ۱۳۸۴؛ ملک‌شهمیرزادی، ۱۳۹۰). نخستین نیایشگاه‌های بین‌النهرین، از جمله معابد اوروک و اریدو، در هزارهٔ سوم پیش از میلاد با خشت‌های دستی و بدون ملات ساخته شدند (Houben & Guillaud, 1994:12) . در دوره‌های بعد، کاخ‌های آشور، ماری و خرس‌آباد، علی‌رغم بهره‌گیری از مصالح فاخر، همچنان از ساختارهای خشتی و گلی استفاده می‌کردند (Houben, 1994:12) .

در فلات ایران نیز، به‌ویژه در تمدن ایلام، خشت و گل مصالح اصلی ساخت‌وساز بود و زیگورات چغازنبیل نمونه‌ای شاخص از این سنت به شمار می‌رود. این شیوه در دورهٔ مادها و هخامنشیان، در محوطه‌هایی چون هگمتانه، پاسارگاد، تخت‌جمشید و شوش تداوم یافت (Perrot et al., 1971; Stronach et al., 1978; Houben & Guillaud, 1994). سنت معماری خشتی در ایران در دوره‌های بعد نیز استمرار داشت و تا سده‌های اخیر در بناهایی چون ارگ بم و بافت‌های تاریخی شهرهای مرکزی ایران مشاهده می‌شود (معصومی، ۱۳۸۳؛ توحیدی، ۱۳۸۳).

منطقهٔ کهن و باستانی سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران، با پیشینه‌ای بسیار غنی و باستانی، به دلیل شرایط اقلیمی گرم و خشک آن، از دیرباز یکی از مهم‌ترین خاستگاه‌های معماری خشت و گلی در ایران بوده است، استفاده از مصالح خاکی، همچون خشت و گل برای ساخت و ساز در این منطقه از دوران پیش از تاریخ و عصر مفرغ در شهر سوخته (Moradi, 2020) تا دوران اسلامی و حتی دوران متأخر تداوم داشته است. این تداوم و پیوستگی در استفاده از مصالح خشت و گلی در معماری موجب شده است که در این منطقه بناها و یادمان‌های معماری بسیار عظیم و مهمی از ادوار مختلف را شاهد باشیم. شهر دهانهٔ غلامان از عصر هخامنشی است(Davtalab, 2021)، کوه خواجه از دوران پارتی، ساسانی و اسلامی(Ghanimati, 2000)، منطقهٔ حوضدار سیستان از دوران ساسانی تا عصر اسلامی (Behboodi, N., & Zohreh, 2020) و شهر زاهدان کهنه از دوران تیموری از جمله مهم‌ترین یادمان‌ها و بناهای تاریخی سیستان است که در تمامی آن‌ها، مصالح اصلی مورد استفاده خشت و گل بوده است (موسوی حاجی، ۱۳۸۸؛ موسوی حاجی و دیگران، ۱۳۸۹) (شکل ۳ و ۴).

محوطهٔ تاریخی زاهدان کهنه از مهم‌ترین و گسترده‌ترین استقرارگاه‌های باستان‌شناسی دورهٔ اسلامی در دشت سیستان به شمار می‌آید (شکل ۱ و ۲). این شهر تاریخی، در فاصلهٔ حدود ۲۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شهرستان زابل و در شمال منطقه زهک واقع شده است (موسوی حاجی، ۱۳۸۸؛ موسوی حاجی و دیگران، ۱۳۸۹). بر اساس منابع تاریخی، بنیان‌گذاری این شهر در حدود سال ۳۶۵ هجری قمری و در زمان خلف بن ابوجعفر بن لیث، واپسین امیر سلسله صفاریان در سیستان، صورت گرفته است (Tate, 1910)

بخش رَبَض شهر زاهدان کهنه که نمونه‌های موردمطالعه در این پژوهش نیز از آن به دست آمده است در واقع، ناحیهٔ پیرامونی و حومهٔ شهر اصلی بوده است. این بخش وسعتی قابل‌توجه داشته، به‌گونه‌ای که اندازهٔ دقیق آن به سبب گستردگی کامل منطقه قابل‌تعیین نیست. با این حال، به نظر می‌رسد محدودهٔ تقریبی ربض از شمال تا ناحیهٔ بی‌بی دوست و از جنوب تا تپهٔ شهرستان امتداد داشته است (موسوی حاجی، ۱۳۸۸) (شکل ۵).

افزون بر این، شواهد باستان شناختی نشان می‌دهد که ساخت‌وسازها و آثار معماری تاریخی در امتداد این محدوده نیز تداوم یافته و تا حوزهٔ برج افغان گسترش پیدا کرده‌اند. این موضوع بیانگر پیوستگی و استمرار سکونت و فعالیت‌های معماری در سراسر دشت بزرگ سیستان است (شکل ۴ و ۵). در سطح تپه‌های باستانی متعددی که در گسترهٔ این محوطهٔ تاریخی بزرگ، پراکنده‌اند، بقایای معماری و دیوارهای ساخته‌شده بسیاری از خشت و گل دیده می‌شود. همچنین در سراسر این شهر کهن، به‌ویژه در ناحیهٔ ربض و مناطق پیرامون آن، از بی‌بی دوست تا برج افغان، یافته‌های متنوع باستان‌شناختی مشاهده شده است. این یافته‌ها شامل قطعات سفال شکسته‌شده مربوط به دوره‌های مختلف اسلامی، قطعات شیشه، فلز، خشت و آجر است که سطح تپه‌ها را در پهنه‌ای وسیع پوشانده‌اند.

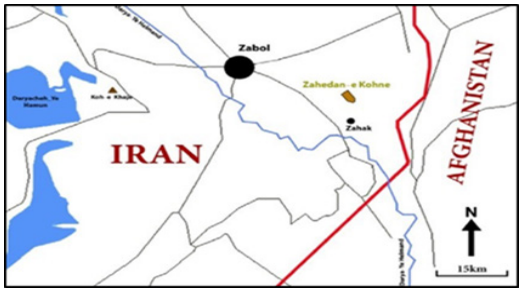
نمونه‌های خشت تاریخی مورد بررسی در این پژوهش از همین منطقه گردآوری شده و برای شناسایی ویژگی‌های کانی‌شناسی، ترکیب شیمیایی و بررسی سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌های تحلیلی و دستگاهی مورد آنالیز و آزمایش قرار گرفته‌اند (شکل ۴ و ۵).

شکل ۱. نقشه ایران و موقعیت شهر زابل (Eftekhari, et al, 2018).

Figure 1. Aerial View of the Zahedan-e Kohneh Historical Site (Eftekhari, et al, 2018)

شکل ۲. موقعیت زاهدان کهنه در سیستان (Mousavi Haji, 2009)

Figure 2. The location of the Zahedan-e-Kohne in Sistan(Mousavi Haji, 2009)



[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

شکل ۳. نمایی از ویرانه‌های محوطهٔ تاریخی زاهدان کهنه (Iran Tourism and Touring (Organization, 2026

Figure 3. A View of the Ruins of the Zahedan-e Kohneh Historical Site (Iran Tourism and Touring Organization, 2026)

شکل ٤. ساختارهای معماری خشتی در زاهدان کهنه سیستان Iran Tourism and (Touring Organization, 2026)

Figure 4. Adobe Architectural Structures of Zahedan-e Kohneh, Sistan (Iran Tourism and Touring Organization, 2026)

۲. پیشینهٔ پژوهش

بررسی و مطالعات اندکی به روش تجربی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بر روی خشت‌های به دست آمده از محوطه‌های باستانی ایران انجام شده است، بیش‌تر پژوهش‌هایی که تا کنون توسط محققان مختلف با محوریت خشت در ایران انجام شده است اغلب بر روی بهینه سازی، تثبیت و تحکیم و بررسی نقش و تاثیر مواد افزودنی مختلف در تهیه خشت‌های جدید و با دوام برای ساخت و ساز و مرمت بناهای تاریخی خشت و گلی متمرکز بوده است.

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از مواد معدنی، صنعتی و افزودنی‌های طبیعی نظیر سیمان، آهک، خاکسترهای کشاورزی و صنعتی و انواع الیاف گیاهی، نقش مؤثری در بهبود مقاومت مکانیکی و دوام مصالح خاکی، به‌ویژه خشت، دارد. در این زمینه، نوانکوار تأثیر خاکستر پوسته برنج (Nwankwor, 2011)، رحیم‌نیا و حیدری نقش دامنه خمیری خاک و سیمان (Rahimnia& Heidari Bani, 2011) ، آلاوز رامیرز و همکاران ترکیب آهک و خاکستر باگاس نیشکر (Alavéz-Ramírez, et al, 2012)، میکلیز و همکاران ضایعات آلومینا و خاکستر زغال‌سنگ (Miqueleiz, et al, 2013) و اریس و همکاران ترکیبات آهک و روغن (Eires, et al, 2013)، را در ارتقای عملکرد خشت گزارش کرده‌اند. همچنین پژوهشگرانی از جمله المهلاوی و کندل با استفاده از رس مونتموریلونیتی و تثبیت‌کننده‌های آهکی–سیمانی (El-Mahllawy, et al, 2014)، حجازی و همکاران با ماسه، گچ، آهک، پودر آجر و کاه (Hejazi, et al, 2015)، ژانگ و همکاران با خاکستر بادی و ماسهٔ کوارتزی (Zhang, et al, 2015) کوریا و همکاران با بزاق مصنوعی موریانه و ذرات بامبو (Corrêa, et al, 2015)، شرما و همکاران با الیاف گیاهی بومی (Sharma , et al, 2015) و کالاتان و همکاران با الیاف کنف (Calatan, et al, 2016)، بر بهبود مقاومت و دوام خشت تأکید دارند.

مطالعهٔ ساختاری و بررسی ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های مکانیکی خشت‌های به کار رفته در بناهای تاریخی مناطق مختلف ایران توسط هادیان به روش پراش‌سنجی و فلورسانس اشعهٔ ایکس در شهر بلقیس اسفراین، قلعهٔ دختر بم، زیگورات چغازنبیل، آتشگاه اصفهان، کنار صندل جیرفت، نوشیجان تپهٔ همدان، تپهٔ سیلک کاشان، قلعهٔ زیویه سقز، روستاهای ابیانه و ماسوله و خانه‌های خشت و گلی تالش و رشت نشان داد که با وجود سیلتی بودن خاک مورداستفاده در خشت به دست آمده از این مناطق و ضعف بخش رسی خاک، وجود ترکیبات مشترک کربناتی در خاک موجب افزایش استحکام و دوام مصالح خاکی همچون خشت در این مناطق شده است. از سوی دیگر تفاوت‌های مشخصی در خاک و خشت مناطق مختلف به دلیل منابع مورداستفاده برای استخراج خاک مصرفی مشاهده شده است، به‌عنوان مثال بر خلاف خاک مورد استفاده در خشت‌های منطقهٔ کنار صندل و قلعهٔ بم در کرمان که دارای خاصیت واگرایی بوده و مقاومت کمی در برابر آب شستگی از خود نشان می‌دهند. خاک رس مورد استفاده برای تهیهٔ خشت در منطقهٔ چغازنبیل غیر واگرا بوده و مقاومت و دوام خوبی در مقابل بارنگی و آب‌شستگی داشته است. عمدهٔ کانی‌های رسی شناخته‌شده در ساختار خشت‌های این مناطق کانی‌های رسی کائولینیت و ایلیت بوده است که در کنار آن‌ها کانی‌هایی چون کوارتز، کلسیت، فلدسپار، آلبیت، ارتوکلاز و موسکویت هم مشاهده می شود (هادیان، ۱۳۹۵). با وجود جامع‌بودن تحلیل‌های شیمیایی و کانی‌شناسی و پوشش گستردهٔ محوطه‌های تاریخی، این پژوهش فاقد هم‌بستگی کمی میان نتایج ترکیب شیمیایی و پارامترهای دقیق مکانیکی بوده و نقش هر کانی در رفتار مکانیکی خشت‌ها به صورت تحلیلی و مدل‌سازی‌شده تبیین نشده است.

مطالعهٔ تجربی و میدانی خشت‌های به کار رفته در ارگ بم توسط ابراهیمی و پدرام در سال ۱۳۹۶ شمسی حاکی از آن بود که این مصالح از نظر فیزیکی و مکانیکی دارای ضعف‌هایی همچون تخلخل و نمک زیاد، ناهمگنی و مقاومت فشاری پایین هستند. بررسی‌های کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی آن‌ها نیز خاطرنشان ساخت که ترکیب اصلی خشت‌ها شامل کوارتز و کلسیت است و کانی‌های رسی از خانوادهٔ ایلیت با کیفیت متوسط در آن‌ها حضور دارند، در حالی‌که فلدسپات‌ها و رس‌های مرغوب‌تر به مقدار قابل‌توجهی در خشت های این مجموعهٔ عظیم خشت و گلی مشاهده نمی‌شوند. این ویژگی‌ها بیانگر فرآوری ناقص خاک و ناپایداری مصالح در برابر تنش‌های محیطی است. با این حال، شناخت دقیق این خصوصیات می‌تواند مبنای بهبود فرمول ساخت و تولید خشت‌های جدید با رفتار مکانیکی بهینه برای مرمت آینده ارگ بم باشد (پدرام و ابراهیمی، ۱۳۹۶).

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

اگرچه این مطالعه تصویری روشن از ضعف‌های فیزیکی و مکانیکی خشت‌های ارگ بم ارائه می‌دهد، اما عدم مقایسهٔ نتایج با خشت‌های تاریخی سالم یا نمونه‌های بهینه‌شده، امکان تعمیم یافته‌ها و استخراج الگوی اصلاح فرمول ساخت خشت را محدود کرده است.

بررسی‌های آزمایشگاهی مختلف بر روی خشت‌های کهن دژ کوه خواجه در سیستان توسط میری و همکاران با تمرکز بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خشت‌های قدیمی و مرمتی قلعهٔ سام از جمله دانه‌بندی، تخلخل، چگالی، خاصیت مویینگی، مقاومت فشاری و پایداری در برابر آب باران مصنوعی و سایش، حاکی از آن بوده است که خشت‌های تاریخی، به دلیل دانه‌بندی متعادل‌تر و وجود مواد آلی و ماسه، در مقایسه با خشت‌های مرمتی عملکرد بهتری در برابر رطوبت و فرسایش داشته‌اند. با این حال بایستی به این نکتهٔ بسیار مهم توجه داشت که نتایج این تحقیق تنها بر پایهٔ آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی به دست آمده و هیچ‌گونه مطالعه‌ای در زمینهٔ ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خشت‌ها انجام نشده است. از این رو، نتیجه‌گیری نهایی دربارهٔ رفتار خشت‌ها در برابر عوامل مخرب رطوبتی و محیطی را نمی‌توان جامع و قطعی دانست. در واقع، فقدان تحلیل‌های شیمیایی و کانی‌شناسی را می‌توان به‌عنوان نقص علمی اساسی این پژوهش بر شمرد، زیرا بدون شناسایی دقیق ترکیب مواد اولیه و نوع کانی‌های رسی، علت واقعی تفاوت‌های مشاهده شده در پایداری خشت‌های تاریخی و مرمتی به‌صورت بنیادی قابل تبیین نیست (Miri, et al., 2020). محدودشدن این پژوهش به آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی و فقدان تحلیل‌های شیمیایی و کانی‌شناسی، مانع از شناسایی علل بنیادی تفاوت عملکرد خشت‌های تاریخی و مرمتی شده و نتیجه‌گیری‌ها را در سطح توصیفی نگه داشته است.

پژوهش ذکوی و ابراهیمی در سال ۱۴۰۲ شمسی برای شناخت ذخایر رسی خشت‌های چغازنبیل نشان داد که برای ساخت خشت‌های این معبد عظیم و باستانی از خاک‌های رودخانه‌ای و سازندی منطقه با ترکیب‌های متفاوت استفاده شده است. تحلیل‌های شیمیایی و کانی‌شناختی خشت‌ها با روش‌های دستگاهی موجب شناسایی کانی های کلسیت، کوارتز، ژیپس و کلینوکلر در بدنهٔ خشت‌های این بنای ایلامی شد که حضور آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در دوام و رفتار مکانیکی خشت‌ها داشته است. نویسندگان اعتقاد دارند که اختلاف رنگ خشت‌ها در این بنا، عمدتاً ناشی از بهره‌گیری از ذخایر مختلف خاک و همچنین حضور الیاف گیاهی مانند جو و گندم در ساخت خشت‌هاست. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که با رعایت قواعد آماده‌سازی خاک، عمل‌آوری گل، قالب‌گیری و خشک‌کردن و همچنین دانه‌بندی مناسب خاک همراه با اختلاط کنترل‌شده ماسه و کاه برای کاهش ترک‌خوردگی، می‌توان خشت‌های مرمتی با مقاومت مکانیکی مطلوب تولید کرد. درصدهای متفاوت بخش گچی در خشت‌ها نیز مؤید استفاده از خاک‌های سازندی و آبرفتی و بهره‌گیری از ذخایر نزدیک به محل بنا، به‌ویژه در اطراف زیگورات و حاشیهٔ رودخانه دز است (ذکوی و ابراهیمی، ۱۴۰۲). با وجود دقت بالای تحلیل‌های شیمیایی و کانی‌شناسی، این پژوهش فاقد ارزیابی مستقیم رفتار مکانیکی خشت‌ها در شرایط بارگذاری و رطوبتی بوده و ارتباط کمی و عددی میان ترکیب مواد و مقاومت سازه‌ای خشت‌ها برقرار نشده است.

رسولی ها و همکاران در پژوهش خود در سال ۱۴۰۳ شمسی برروی تحلیل ویژگی های خاک بر مقاومت مکانیکی خشت‌های استان یزد با بررسی آزمایشگاهی نمونه هایی از خشت‌های به کار رفته در بناهای تاریخی شهرهای مختلف استان یزد با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی شامل آنالیز کانی‌شناسی و شیمیایی، نشان دادند که کوارتز و کلسیت بیش‌ترین سهم را در ساختار خشت این استان دارند و وجود کلسیت موجب افزایش استحکام و کاهش تورم خشت‌ها می‌شود. آنالیز شیمیایی نشان داد که خشت‌ها دارای مقادیر مناسب مواد رسی و سیلیس هستند و درصد کلسیم بالا عامل چسبندگی و مقاومت مکانیکی آن‌هاست. همچنین تناسب ذرات ریزدانه و درشت‌دانه، تراکم و تخلخل ساختار خشت را تعیین کرده و عملکرد آن در برابر جذب آب و ترک‌خوردگی را بهبود می‌بخشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد شناخت دقیق ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خاک، برای مرمت و تولید خشت‌های مرمتی با دوام و مقاوم کاملا مطلوب و ضروری است (حاجی رسولی ها و همکاران، ۱۴۰۳). اگرچه این تحقیق نقش ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی را در بهبود مقاومت خشت‌ها به‌خوبی نشان می‌دهد، اما تنوع اقلیمی و تفاوت‌های فناوری ساخت در مقیاس محلی کمتر مورد توجه قرار گرفته و تحلیل‌ها عمدتاً در سطح استانی باقی مانده‌اند.

پارچه‌باف و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی به بررسی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خشت‌های چهار بنای تاریخی کاشان از دوره نوسنگی تا قاجار پرداختند. در این مطالعه، آزمایش‌های فیزیکی شامل سنجش چگالی، دانسیته، رطوبت، دانه‌بندی و حدود آتربرگ، آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی، و تحلیل‌های کانی‌شناسی با روش پراش پرتو ایکس (XRD) بر اساس استانداردهای ASTM و ISIRI انجام شده است که نتایج XRD نشان دادند که کوارتز، کلسیت و آلبیت مهم‌ترین کانی‌های سازنده خشت‌ها هستند. نمونهٔ مربوط به دورهٔ سلجوقی (C3) بالاترین دانسیته و مقاومت و نمونهٔ نوسنگی (C1) پایین‌ترین مقادیر را دارا بود؛ همچنین ترکیب دانه‌بندی مناسب و درصد ماسهٔ بیش‌تر موجب افزایش تراکم و استحکام خشت‌ها شد. یافته‌ها در مجموع نشان می‌دهد که طی گذر زمان، دانش و مهارت در انتخاب و عمل‌آوری خاک بهبود یافته و کیفیت و دوام خشت‌های دوره‌های متأخر نسبت به نمونه‌های کهن ارتقا یافته است (پارچه باف و دیگران، ۱۴۰۳). با وجود رویکرد منسجم آزمایشگاهی و مقایسه بین‌دوره‌ای، این پژوهش به بررسی تأثیر عوامل محیطی بلندمدت و شرایط بهره‌برداری واقعی بر دوام خشت‌ها نپرداخته و نتایج آن بیش‌تر به شرایط آزمایشگاهی محدود مانده است.

با وجود مطالعات گستردهٔ انجام‌شده دربارهٔ ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خشت‌های تاریخی در مناطق مختلف ایران، همچنان خلأ دانشی قابل‌توجهی در ایجاد پیوندی نظام‌مند و تحلیلی میان ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خاک با رفتار مکانیکی، دوام و عملکرد بلندمدت خشت‌ها در شرایط واقعی محیطی وجود دارد. بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها یا صرفاً بر آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی متمرکز بوده‌اند یا به تحلیل‌های شیمیایی و کانی‌شناسی بسنده کرده‌اند، بی‌آن‌که رابطه‌ای کمی، قابل‌تعمیم و مبتنی بر داده‌های تجربی استاندارد میان این مجموعه داده‌ها برقرار شود. از سوی دیگر، مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز غالب مطالعات در

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

حوزهٔ مصالح خاکی، به‌ویژه خشت، بر بهینه‌سازی خشت‌های نوین و دستیابی به ویژگی‌های مطلوب فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی برای کاربرد در ساخت‌وسازهای معاصر یا تولید خشت‌های مرمتی بوده است، در حالی که پژوهش‌های اندکی به بررسی نظام‌مند خشت‌های کهن به‌کاررفته در بناهای تاریخی ایران اختصاص یافته‌اند. افزون بر این، در مطالعات محدود انجام‌شده بر خشت‌های تاریخی نیز، تأکید عمدتاً بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بوده و کم‌تر پژوهشی به صورت تجربی و بر پایه روش‌های آزمایشگاهی علمی و استاندارد، به شناسایی و تحلیل ترکیب خاک، ساختار فازی، نوع و درصد کانی‌های رسی، نقش ترکیبات کربناتی، الیاف گیاهی و شرایط اقلیمی و تأثیر هم‌زمان آن‌ها بر رفتار عملکردی، پایداری رطوبتی و دوام بلندمدت خشت‌ها پرداخته است؛ امری که موجب شده تدوین دستورالعمل‌های علمی، بومی و مبتنی بر شواهد برای تولید خشت‌های مرمتی سازگار با مصالح تاریخی، همچنان با عدم قطعیت و کاستی‌های بنیادی مواجه باشد.

اهمیت و ضرورت انجام این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که از میان هزاران بنای تاریخی خشتی و گلی پراکنده در سراسر ایران، تنها در شمار اندکی از آن‌ها ترکیب مواد و مصالح به‌کاررفته، به‌ویژه خشت‌ها، به‌صورت دقیق و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. از این‌رو، هدف اصلی این تحقیق، بررسی ساختاری، شناسایی ترکیب کانی‌شناسی و تعیین ترکیب شیمیایی خشت‌های تاریخی مکشوفه از بخش‌هایی از سرزمین کهن و باستانی سیستان است. این مطالعه با تکیه بر روش‌های تجربی و آزمایشگاهی استاندارد انجام شده تا ضمن تکمیل داده‌های علمی موجود در زمینه خشت‌های تاریخی، گامی در جهت رفع خلأ پژوهشی در این حوزه برداشته شود. بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش آن است که ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی خشت‌های تاریخی سیستان تا چه اندازه در دوام، پایداری و رفتار مکانیکی آن‌ها نقش داشته و چگونه می‌توان از شناخت این ترکیب‌ها در بهبود فرایند حفاظت و مرمت بناهای خشتی منطقه بهره گرفت.

در این تحقیق، تعدادی از خشت‌های به دست آمده از بناها و ساختارهای معماری باقیمانده در منطقهٔ برج افغان در نزدیکی محوطهٔ بی بی دوست در سیستان به روش تجربی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مختلف مورد مطالعه و آنالیز قرار گرفت تا به این ترتیب ساختار خاک تشکیل‌دهندهٔ این خشت‌های تاریخی کهن و ترکیب شیمیایی آن‌ها بر اساس مطالعهٔ آزمایشگاهی نمونه‌های تاریخی اصیل مورد شناسایی قرار گیرد که مسئلهٔ مهم و اصلی این پژوهش است.

۳. مواد و روش ها

۳-۱. مواد

در این پژوهش، تعداد ۳۲ نمونه از خشت‌های به‌دست‌آمده از بقایای معماری فروریخته در محدوده‌ای تاریخی واقع در دشت سیستان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و با توجه به بودجه پژوهشی موجود و بر اساس رنگ، بافت و ابعاد خشت ها از میان آن‌ها ۸ نمونه خشت به‌طور تصادفی برای بررسی به شیوه‌های مختلف آزمایشگاهی برگزیده شدند، به‌گونه ای که این مجموعه نمایندهٔ کل خشت‌های موردمطالعه باشد (شکل ۷). این نمونه‌ها که به دورهٔ اسلامی تعلق دارند، طی مطالعات سطحی لارضی در ناحیهٔ موسوم به «برج افغان» در مجاورت محوطهٔ تاریخی «بی‌بی دوست» از توابع شهرستان زابل جمع‌آوری شده‌اند. محل به‌دست‌آمدن این خشت‌ها در بخش پایانی و حاشیه‌ای شهر تاریخی زاهدان کهنه قرار دارد؛ ناحیه‌ای که در دوران اسلامی سیستان، بخش ربض یا حومهٔ شهر را تشکیل می‌داده است (اشکال ۵-۷). لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌های خشت‌های تاریخی موردمطالعه در این پژوهش، از ساختارهای معماری خشتی پراکنده در محوطهٔ باستانی فوق که در اثر عدم رسیدگی و حفاظت دچار تخریب و فروریختگی دیوارها بود و در کنار ساختار معماری در سطح زمین ریخته بود، جمع‌آوری گردیدند تا ضمن مستند نگاری و ثبت شواهد مربوطه و نگهداری آن‌ها در مخزن موزهٔ سیستان، داده‌های آن‌ها استخراج و به‌عنوان شواهد تاریخی و معماری منطقه حفاظت و نگهداری شود.

محوطهٔ تاریخی زاهدان کهنه یکی از شاخص‌ترین و گسترده‌ترین محوطه‌های باستان‌شناسی دوران اسلامی در دشت سیستان به شمار می‌آید (اشکال ۱-۴). این شهر که در شمال منطقهٔ زهک از توابع شهرستان زابل است، در سده‌های پنجم تا نهم هجری قمری به‌عنوان مرکز اصلی سیستان بزرگ نقش محوری داشته است (موسوی حاجی، سید رسول، ۱۳۸۸؛ موسوی حاجی، سید رسول و دیگران، ۱۳۸۹).

بخش ربض یا حومهٔ این شهر تاریخی که نمونه‌های موردمطالعه در این پژوهش از آن به دست آمده، ناحیه‌ای بسیار مهم و وسیع بوده است که امروزه به دلیل وسعت زیاد و مداخلات بسیار در طی گسترش بافت شهری زابل، امروزه تعیین دقیق حدود آن امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، شواهد باستان‌شناسی حاکی از آن است که ساختارهای تاریخی و معماری شهر در فراتر از این محدوده و تا ناحیهٔ برج افغان نیز گسترش داشته‌اند؛ موضوعی که از تداوم و پویایی استقرار انسانی و معماری در این بخش از دشت سیستان حکایت دارد (شکل ۵ و ۶).

شکل ۵. شکل هوایی ربض زاهدان کهنه، بی‌بی دوست تا برج افغان (googl Earth)

Figure 5. Aerial View of the Rabaz District of Zahedan-e Kohneh,, the Borj-e Doost to Borj-e Afghan (google Earth

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

در سطح بیش‌تر تپه‌ها و بقایای معماری فروریخته در ناحیهٔ ربض و اطراف آن از بی‌بی دوست تا برج افغان، آثار و یافته‌های فراوانی از جمله قطعات سفال‌های شکستهٔ تاریخی که عمدتاً متعلق به دوران اسلامی است، به همراه قطعات کامل و شکستهٔ خشت، آجر، فلز و شیشه مشاهده می‌شود (باتر و سراجی، ۱۴۰۱) (شکل ۶).

شکل ٦. ساختارهای تاریخی معماری خشتی در منطقه برج افغان نزدیک بی بی دوست

Figure 6. Historical Adobe Architectural Structures Afghan Area near Bi BiDoost Bibi

نمونه‌های خشتی موردبررسی در این پژوهش نیز از همین محدوده گردآوری شده‌اند. این نمونه‌ها با هدف شناسایی کانی‌های سازنده، ترکیب شیمیایی بدنه و ارزیابی ویژگی‌های کانی شناختی و شیمیایی خشت‌ها، با استفاده از روش‌های مختلف علمی و آزمایشگاهی مورد مطالعه و آنالیز قرار گرفته‌اند (شکل ۷ و جدول ۲).

شکل ۷. نمونه‌های خشت‌های تاریخی مورد مطالعهٔ مکشوفه از منطقهٔ برج افغان سیستان در نزدیکی بی بی دوست زابل

Figure 7. The Studied Historical Adobe Samples Recovered from the Borj-e Afghan Area of Sistan, near Bibi Doost in Zabol

جدول ۱. روش های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش و کد استاندارد هر یک از آن‌ها

Table 2. The Laboratory Methods Used in This Research and the Standard Code for Each Method

نوع آزمایش Type of Test	روش آزمایش Test Method	کد استاندارد Standard Code	تعداد نمونه Number samples
اندازه‌گیری درصد مواد آلی بدنه خشت	حرارت در کوره	ASTM D2974	6
اندازه‌گیری درصد سولفات کلسیم بدنهٔ خشت	وزن سنجی	ASTM C1580-20	8
اندازه‌گیری درصد کربنات کلسیم بدنهٔ خشت	تیتراسیون (حجم سنجی)	ASTM D4373-96	8
شناسایی ترکیب کانی‌شناسی بدنهٔ خشت	پراش اشعه ایکس(XRD)	ASTM E3294-22	6
شناسایی ترکیب عنصری بدنهٔ خشت	فلورسانس اشعه ایکس (XRF)	ASTM D8064-16	6

۳-۲. روش‌ها

به منظور بررسی و مطالعهٔ نمونه‌های خشت موردنظر به روش تجربی با استفاده از شیوه‌های مختلف آزمایشگاهی، در آغاز، از تمامی قطعات به‌طور مجزا تصویربرداری شد و سپس ساختار ظاهری و بافت خشت‌ها به روش مطالعهٔ ماکروسکوپی و میکروسکوپی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. برای آنالیز ساختار و ترکیب شیمیایی بدنهٔ خشت‌ها، به مقدار بسیار اندکی از بدنه آن‌ها، به‌طور جداگانه نمونه برداری شد. ابتدا برای آنالیزهای کلاسیک به روش شیمی تر نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند تا میزان کربنات کلسیم و سولفات کلسیم آن‌ها اندازه گیری شود. به منظور تعیین درصد کربنات کلسیم در نمونه‌های خشت، از روش تیتراسیون اسید–باز استفاده شد. بدین منظور، یک گرم از نمونهٔ پودر و همگن‌شدهٔ خشت با ۲۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک نرمال واکنش داده و به مدت یک ساعت در دمای محیط نگهداری شد. پس از صاف‌سازی، محلول حاصل با سود نرمال و با استفاده از معرف آبی برموتیمول تیتر گردید. نقطهٔ پایانی واکنش بر اساس تغییر رنگ محلول از زرد به آبی تعیین شد و درصد کربنات کلسیم بر پایهٔ حجم اسید مصرفی و روابط استوکیومتری محاسبه گردید. برای تعیین درصد سولفات کلسیم در نمونه‌های خشت نیز، یک گرم از نمونه آسیاب‌شده خشت با آب مقطر و اسید HCl واکنش داده شد، سپس محلول حاصل پس از صاف‌سازی با محلول کلرید باریم با غلظت صد گرم در لیتر رسوب‌دهی شد و بلورهای سولفات باریم حاصل به مدت یک هفته رشد داده شدند. رسوب جداشده همراه با کاغذ صافی بدون خاکستر در بوته چینی و در کوره الکتریکی تا دمای ۹۵۰ درجهٔ سانتیگراد، حرارت داده شد تا خشک و کلسینه گردد. پس از سردشدن، وزن نهایی رسوب اندازه‌گیری و درصد سولفات کلسیم نمونه بر اساس نسبت استوکیومتری محاسبه گردید. علاوه بر این به منظور شناخت ترکیب کانی شناختی و فازهای تشکیل‌دهندهٔ بدنهٔ این خشت‌ها نمونه‌ها به روش پراش سنجی پرتو ایکس(XRD) با دستگاه XRD مدل D8

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

ADVANCE Bruker ساخت کشور آلمان با تیوب مس ساختار و ترکیب کانی شناختی نمونه‌ها مورد مطالعه و آنالیز قرار گرفت. ترکیب شیمیایی و عناصر تشکیل‌دهندهٔ بدنه نمونه‌های خشت نیز به دستگاه فلورسانس اشعهٔ ایکس(XRF) Bruker مدل S4PIONEER ساخت آلمان مورد آنالیز قرار گرفت. تعداد نمونه‌ها در هر یک از آزمایشات و روش‌های مورد استفاده در این مطالعات تجربی به شرح زیر در جدول ۱ آمده است:

٤. یافته‌ها و بحث

٤-١. بررسی و مطالعهٔ تاریخی و مشخصات ظاهری خشت‌ها

بررسی و مطالعهٔ مشخصات ظاهری خشت‌های به دست آمده از منطقهٔ برج افغان سیستان حاکی از آن است که خشت‌های این منطقه به دو شکل مربع و مستطیل شکل یافت می‌شود که دارای ابعاد بسیار بزرگی است. در خشت‌های مستطیل شکل طول خشت‌ها بین ۳۵ تا ۳۲ سانتی‌متر و عرض آن‌ها بین ۱۵ تا ۱۸ سانتی‌متر متغیر است و در خشت‌های مربع شکل طول اضلاع خشت بین ۴۲ تا ۳۵ سانتی‌متر متفاوت است (شکل ۷ و جدول ۱). بیش‌تر خشت‌ها با وجود قدمت زیاد از انسجام خوبی برخوردار بوده و رنگ آن‌ها خاکی تا قهوه‌ای رنگ است. عمده پرکننده‌های به کار رفته در بدنهٔ خشت‌ها برای کاهش انقباض و جلوگیری از ترک‌خوردن آن‌ها الیاف کاه و ذرات شن و ماسه است (شکل ۷)

از میان ۳۲ قطعهٔ خشت تاریخی به دست آمده از منطقهٔ برج افغان در سیستان که تمامی آن‌ها به دوران اسلامی تعلق دارد، ۸ قطعه خشت به‌طور اتفاقی (Random) برای بررسی و مطالعهٔ ازمایشگاهی به شیوه‌های مختلف انتخاب گردید و با توجه به محدودیت‌های بودجه از میان این ۸ قطعه ۶ قطعه به‌طور تصادفی برای آنالیز دستگاهی بدنه خشت‌ها برگزیده شد. مشخصات ظاهری خشت‌های مورد مطالعه در این پژوهش و کد آن‌ها به شرح زیر در جدول ۲ آمده است.

مطالعات تطبیقی انجام‌شده بر روی خشت‌های مورد مطالعه در این پژوهش نشان داد که از نظر ابعاد، شکل و ویژگی‌های ساختاری، بیش‌ترین همخوانی میان این نمونه‌ها و خشت‌های معماری دوره‌های ایلخانی و تیموری مشاهده می‌شود. این نتایج با یافته‌های باستان‌شناختی دشت سیستان، گزارش‌شده توسط موسوی حاجی و همکاران، کاملاً سازگار است (موسوی حاجی و دیگران، ۱۳۸۹). همچنین، این قدمت با تحلیل سفال‌های مکشوفه از محدودهٔ زاهدان کهنه و برج افغان در نزدیکی بی‌بی‌دوست، که این خشت‌ها نیز از همان ناحیه به‌دست آمده‌اند، مطابقت نسبی دارد؛ چرا که بخش عمده‌ای از هزاران قطعه سفال مطالعاتی بدست آمده از این ناحیه، به دوران اسلامی و عمدتاً قرون ۴ تا ۶ هجری قمری (دوره سلجوقی تا اوایل ایلخانی) تعلق دارند (باتر و سراجی، ۱۴۰۲).

مقایسهٔ دقیق ابعاد نمونهٔ خشت‌های موردمطالعه، شامل خشت‌های مستطیلی میان‌سایز (با میانگین ۱۵×۳۳ تا ۱۷×۳۵ سانتی‌متر) و خشت‌های بزرگ مربع‌شکل (۳۷×۳۷ تا ۴۲×۴۲ سانتی‌متر)، نشان می‌دهد که این اندازه‌ها با استانداردهای به‌کاررفته در معماری ادوار میانی اسلامی، به‌ویژه از دوران ایلخانی تا عصر تیموری، تطابق قابل‌توجهی دارند. علاوه بر این، قدمت و دورهٔ تاریخی این خشت‌ها، با توجه به بستر کشف نمونه‌ها در نزدیکی محوطهٔ تاریخی زاهدان کهنه و ناحیه برج افغان، بر اساس شواهد باستان‌شناختی و گونه‌شناسی سفال‌های مطالعاتی، حضور پررنگ استقرار و فعالیت‌های ساختمانی در بازهٔ قرون ۴ تا ۹ هجری قمری، تأیید می‌شود. از این‌رو، به نظر می‌رسد که احتمالاً، خشت‌های مورد بررسی متعلق به اواخر قرون میانی اسلامی، یعنی قرن‌های ۷ تا ۹ هجری قمری و مربوط به یکی از دوره‌های ایلخانی یا تیموری بوده‌اند.

جدول ۲. مشخصات نمونه خشت‌های موردمطالعه در این پژوهش

Table 1. Specifications of the adobe samples examined in this study

No	sample code	place of discovery	The color of paste pottey	Sample form	Length mm	width mm	Thickness mm	Filler type
1	BD-1399-Ab01	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Sample form	330	150	50	Straw fibers mixed sand & fine aggregate
2	BD-1399-Ab02	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Rectangular	330	160	50	Straw fibers mixed sand & fine aggregate
3	BD-1399-Ab03	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Rectangular	330	180	60	Straw fibers mixed sand & fine aggregate
4	BD-1399-Ab04	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Rectangular	350	17	70	Straw fibers mixed sand & fine aggregate
5	BD-1399-Ab05	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Rectangular	370	18	50	Straw fibers mixed sand & fine aggregate
6	BD-1399-Ab06	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Rectangular	370	370	60	Straw fibers mixed sand & fine aggregate
7	BD-1399-Ab07	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Square	380	380	70	Straw fibers mixed sand & fine aggregate
8	BD-1399-Ab08	Afghan tower area-Zabol	Light brownish-gray	Square	420	420	50	Straw fibers mixed sand & fine aggregate

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

٤-٢. اندازه گیری درصد سولفات کلسیم بدنه خشت های تاریخی به روش وزن سنجی

یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی فرایندهای تخریبی و تشخیص میزان آسیب‌دیدگی مصالح گلی در بناهای خشتی، اندازه‌گیری درصد سولفات کلسیم در خشت‌ها، است (جدول ۳). حضور و افزایش سولفات‌ها به‌ویژه سولفات کلسیم می‌تواند نتیجه‌ی نفوذ آب‌های سولفاته، صعود نم‌موئینه، آلودگی‌های محیطی یا واکنش‌های شیمیایی داخلی باشد و به ایجاد برآمدگی، پف‌کردگی، ریزدانه‌شدن ماتریس خاکی، جداشدگی لایه‌ها و تسریع فرسایش منجر شود. آنالیز کمی درصد سولفات‌ها در بدنه نمونه های خشت نه‌تنها برای شناخت منشاء تخریب ضروری است، بلکه برای انتخاب روش‌های درمانی مناسب نیز اهمیت حیاتی دارد. بنابراین اندازه‌گیری درصد سولفات کلسیم، ابزاری بنیادی در مطالعه میراث معماری خشتی است که امکان پایش روند فرسایش، پیش‌بینی مخاطرات و طراحی مداخلات حفاظتی علمی را فراهم می‌کند و نقش مهمی در تصمیم‌گیری برای مرمت اصولی بناهای تاریخی دارد (Charola, 2000; Charola, Pühringe and Steiger, 2007; Wons, Kłosek-Wawrzyn & Rzepa, 2025).

جدول ۳. نتایج حاصل آنالیز کمی درصد سولفات کلسیم بدنه خشت ها به روش وزن سنجی

Table 3. Results of the quantitative analysis of calcium sulfate content in the body of the mudbricks using the gravimetric method

No	Sample Code	W% $CaSO_4.2H_2O$
1	BD-1399-Abo1	1.32
2	BD-1399-Abo2	0.88
3	BD-1399-Abo3	1.18
4	BD-1399-Abo4	0.95
5	BD-1399-Abo5	1.40
6	BD-1399-Abo6	1.10
7	BD-1399-Abo7	0.26
8	BD-1399-Abo8	1.03

نتایج اندازه‌گیری درصد وزنی سولفات کلسیم در هشت نمونه خشت تاریخی مکشوفه از دشت سیستان، که به روش و وزن‌سنجی با دقت تعیین شده است (جدول ۳)، در دامنه ۰٫۲۶ تا ۱٫۴۰ درصد با میانگین حدود ۱٫۰۲ درصد قرار دارد. این مقادیر نشان می‌دهد خشت‌ها تحت تأثیر یک منبع رطوبتی فعال و پایدار، به‌ویژه صعود موئینه از بستر زمین، قرار داشته‌اند و حضور سولفات‌ها بیانگر شرایط «نیمه‌بحرانی اما قابل مدیریت» است. منابع احتمالی سولفات کلسیم شامل خاک اولیه و رس طبیعی، نفوذ نمک‌های محلول از محیط، برهم‌کنش میان آهک، گچ و سولفات‌ها و فرآیندهای تخریبی مانند تشکیل ژیپس در ریزساختار خشت است. مقادیر حدود ۱٪ و بالاتر نشان‌دهنده فعالیت مهاجرت نمک‌ها، شوره‌زدگی، چرخه انحلال–تبلور ژیپس و تنش‌های کریستالی داخلی بوده که می‌تواند منجر به کاهش انسجام ماتریس رسی، افزایش تخلخل مؤثر، ضعف مقاومت فشاری، توسعه ترک‌های ریز و پودرشدگی سطحی در خشت ها شود. در مقابل، مقادیر پایین‌تر مانند ۰٫۲۶ درصد، حاکی از تأثیر کمتر مهاجرت نمک‌ها، شرایط خشک‌تر و محافظت‌شده یا ناهمگنی ترکیب خاک اولیه است. این پراکندگی عددی نشان‌دهنده فرآیندهای سنتی ساخت دستی خشت، عدم یکنواختی خاک اولیه و احتمال انتقال نمک از بستر به سطح است. تحلیل تلفیقی داده‌های این آنالیز حاکی از ضرورت اجرای راهبردهای هدفمند مدیریت رطوبت شامل اصلاح زهکشی و کنترل مسیرهای نفوذ آب برای پیشگیری از آسیب‌های تدریجی به خشت‌ها است. این یافته‌ها با گزارش‌های بین‌المللی حفاظت از بناهای خشتی، نظیر نمونه‌های مستند در یمن و مراکش، همخوانی دارد و اهمیت مدیریت رطوبت بلندمدت به عنوان عامل اصلی ورود سولفات و محرک آسیب‌های تدریجی را تأکید می‌کند.

٤-٣. اندازه گیری درصد کربنات کلسیم بدنه خشت های تاریخی به روش تیتراسیون

در خشت‌های تاریخی، تعیین درصد کربنات کلسیم یکی از سنجش‌های بنیادی برای درک وضعیت پایداری و میزان تغییرات ساختاری مصالح گلی به‌شمار می‌آید (جدول ۴). کربنات کلسیم، بسته به مقدار و چگونگی حضورش، می‌تواند نقش مهمی در افزایش استحکام، تراکم‌پذیری کمتر، و بهبود رفتار مکانیکی خشت ایفا کند و در بسیاری از موارد به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده طبیعی شناخته می‌شود. در مقابل، کاهش یا دگرگونی این فاز معدنی، به‌ویژه در شرایط رطوبتی نامناسب یا محیط‌های اسیدی، ممکن است موجب افت مقاومت، سست‌شدن بافت و تشدید فرسایش شود. به همین دلیل، سنجش کمی $CaCO_3$ به پژوهشگر این امکان را می‌دهد که منشأ تغییرات، میزان تخریب، کیفیت اولیه خاک و ظرفیت طبیعی تثبیت‌شدگی خشت را بهتر تشخیص دهد و بر اساس آن، راهکارهای حفاظتی و درمانی متناسب از جمله اصلاح مصالح، تثبیت آهکی، یا کنترل شرایط رطوبت را انتخاب کند. از این‌رو اندازه‌گیری دقیق کربنات کلسیم، بخشی ضروری از ارزیابی‌های ژئوتکنیکی و مطالعات حفاظت مصالح معماری خشتی محسوب می‌شود و در تصمیم‌گیری‌های مرمتی نقش تعیین‌کننده دارد. در این پژوهش ۸ نمونه از خشت های انتخابی به طورز تصادفی پس از نمونه برداری به شیوه تیتراسیون مورد ازمایش قرار گرفت و درصد کربنات کلسیم آنها تعیین شد که نتایج آن به شرح زیر است (جدول ۴). نتایج حاصل از آنالیز بدنه خشت‌ها به روش تیتراسیون به‌منظور تعیین درصد کربنات کلسیم نشان داد که مقادیر $CaCO_3$ بین ۹ تا ۴۰٫۵ درصد نوسان داشته و از تغییرپذیری بالایی برخوردار است (جدول ۴). این دامنهٔ گسترده بیانگر ناهمگنی قابل توجه خاک اولیه و نیز فرآیند سنتی، دستی و غیرکنترل‌شدهٔ ساخت خشت‌هاست. نمونه‌هایی با مقادیر بالای کربنات کلسیم (۳۵–۴۰٫۵٪) احتمالاً از خاک‌هایی با غلظت طبیعی بالای فازهای آهکی تهیه شده‌اند، در

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

حالی که نمونه‌های با مقادیر پایین‌تر (۹–۹۲٪) به خاک‌های رسی خالص‌تر یا با سهم آهکی کم‌تر وابسته‌اند.

جدول ٤. نتایج حاصل آنالیز کمی درصد کربنات کلسیم بدنه خشت ها به روش تیتراسیون

Table 4. Results of the quantitative analysis of calcium carbonatecon-tent in the body of the mudbricks using the titration method

No	Sample Code	CaCO3 W%
1	BD-1399-Abo1	25
2	BD-1399-Abo2	25.5
3	BD-1399-Abo3	9
4	BD-1399-Abo4	35
5	BD-1399-Abo5	9
6	BD-1399-Abo6	40.5
7	BD-1399-Abo7	21
8	BD-1399-Abo8	9.2

افزایش درصد کربنات کلسیم می‌تواند به‌صورت بالقوه موجب متراکم‌تر شدن ریزساختار، کاهش فضای خالی مؤثر و افزایش سختی ماتریس خشت شود و از این طریق رفتار مکانیکی مقاوم‌تری را القا کند؛ با این حال، در صورت حضور رطوبت و برهم‌کنش با فازهای رسی فعال، این خشت‌ها مستعد بروز تنش‌های انقباض–انبساط و ایجاد ترک‌های ریز خواهند بود. در مقابل، خشت‌هایی با درصد پایین کربنات کلسیم (۹–۱۰٪) معمولاً دارای تخلخل بالاتر و انسجام کمتری هستند که این ویژگی می‌تواند نفوذپذیری آب، شورزدگی و آسیب‌پذیری آن‌ها را در برابر چرخه‌های انحلال–تبلور یون‌ها افزایش دهد.

لازم به تأکید است که این ارزیابی بر پایه آزمون‌های مکانیکی مستقیم انجام نشده، بلکه تفسیر کیفی رفتار مکانیکی خشت‌ها بر اساس درصد $CaCO_3$، ترکیب کانی‌شناسی و روابط شناخته‌شده ریزساختار–رفتار مصالح خشتی ارائه شده است. از این رو، ارتباط میان میزان کربنات کلسیم و استحکام خشت‌ها به‌عنوان یک همبستگی رفتاری و تطبیقی در نظر گرفته می‌شود و نه یک رابطه کمی اثبات‌شده.پراکندگی این مقادیر حاکی از استفاده از خاک‌های محلی مختلف بدون فرآوری یکسان و احتمالاً عدم شست‌وشوی کافی خاک یا اختلاط دستی با آهک است. درصدهای بالاتر می‌تواند نشان‌دهنده اضافه کردن آهک به منظور افزایش انسجام و سختی خشت باشد، فرآیندی که در فناوری سنتی ساخت خشت‌ها در گذشته مرسوم بوده است (Ascensão, et al, 2025).

٤-٤. آنالیز کمی ترکیب شیمیایی بدنه خشت های تاریخی به روش فلورسانس پرتوی ایکس (XRF)

به کارگیری روش فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) برای سنجش کمی ترکیب شیمیایی خشت‌های تاریخی، نقش مهمی در شناخت ویژگی‌های بنیادی این مصالح و ارزیابی وضعیت پایداری آن‌ها دارد. این روش با اندازه‌گیری دقیق درصد عناصر مختلف، تصویری روشن از ترکیب شیمیایی، منشأ خاک، نوع رس‌ها، میزان مواد آهکی، حضور اکسیدهای تقویتی و حتی املاح مخرب ارائه می‌دهد. چنین اطلاعاتی به پژوهشگر کمک می‌کند تا روندهای فرسایش، تغییرات شیمیایی، میزان تأثیر املاح و کیفیت اولیه مواد را با دقت بیشتری دنبال کند و بر همین اساس، روش‌های مناسب برای تحکیم، بهبود رفتار مکانیکی، اصلاح خاک و انتخاب اقدامات حفاظتی را تعیین نماید. اهمیت XRF در این است که با اتکا به داده‌های کمی و قابل استناد، امکان شناخت منبع تهیهٔ مواد اولیه و تحلیل دقیق عوامل تخریب را فراهم می‌سازد و به‌عنوان ابزاری مهم در برنامه‌ریزی علمی برای مرمت و تقویت بناهای خشتی تاریخی عمل می‌کند. در این بخش ۶ نمونه خشت انتخابی به صورت اتفاقی پس از نمونه برداری از بدنه به روش فوق مورد آنالیز قرار گرفتند که نتایج آن به شرح زیر در جدول ۵ آمده است.

نتایج حاصل از XRF شش نمونه خشت مورد مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی خشت‌ها شامل مقادیر بالای SiO_2 (۳۸–۴۶٪)، CaO (۹–۱۸٪)، Al_2O_3 (۹–۱۱٪)، Fe_2O_3 (۳–۵٪) و مقادیر کمتری از K_2O، Na_2O، MgO و SO_3 است. این ترکیب عناصر را می‌توان از دیدگاه شیمی معدنی و زمین‌شناسی به تفکیک به شکل زیر تجزیه و تحلیل کرد:

– سیلیس (SiO_2) : سیلیس (SiO_2) در ترکیب خشت‌ها عمدتاً به‌صورت دانه‌های کوارتز و فازهای سیلیسی غیرپلاستیک حضور دارد که در الگوهای XRD نیز به‌طور غالب شناسایی شده‌اند. نسبت بالای SiO_2 به Al_2O_3 (تقریباً ۳ تا ۴ به ۱) در این نمونه‌ها، به‌عنوان یک شاخص ژئوشیمیایی–کانی‌شناسی، بیانگر غلبه نسبی فازهای سیلیسی بر فازهای رسی آلومینوسیلیکاته در خاک مورد استفاده است. بدون آن‌که دلالت بر تعیین مستقیم دانه‌بندی داشته باشد. حضور غالب کوارتز، به دلیل سختی بالا، پایداری مکانیکی و حداقل تغییر شکل پلاستیک، می‌تواند به‌صورت بالقوه موجب بهبود رفتار سایشی و افزایش پتانسیل مقاومت مکانیکی خشت‌ها شود.

جدول ۵. نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی بدنه خشت ها به روش فلورسانس پرتوی ایکس (XRF)

Table 5. Results of the chemical composition analysis of the mudbrick matrix using X-ray fluorescence (XRF)

sample no Adobe	W% SiO2	W% CaO	W% Al2O3	W% Fe2O3	W% MgO	W% K2O	W% Na2O	W% TiO2	W% SO3	W% P2O5	W% MnO	W% Cl	W% SrO	W% BaO	W% CuO	W% ZrO2	W% Rb2O	W% ZnO	LOI**
BD-1399-Abo2	38.17	13.13	9.68	3.41	3.19	1.79	1.32	0.459	0.247	0.15	0.056	0.199	0.029	0	0.013	0.013	0.005	0	28.01
BD-1399-Abo3	44.35	18.54	10.2	4.19	3.43	2	1.60	0.596	0.405	0.15	0.073	0.271	0.044	0	0.020	0.019	0.007	0	13.92
BD-1399-Abo4	44.42	16.38	11.1	4.431	3.78	2.19	1.45	0.596	0.699	0.21	0.079	0.262	0.037	0	0.023	0.018	0.008	0.014	14.08
BD-1399-Abo6	44.93	17.17	10.5	4.60	3.26	2.30	1.38	0.616	1.26	0.170	0.083	0.449	0.039	0	0.021	0.019	0.006	0.010	99.76
BD-1399-Abo7	45.40	16.86	11	5.14	3.31	2.40	1.16	0.669	0.461	0.18	0.095	0.17	0.044	0.039	0.021	0.023	0.011	0.012	12.81
BD-1399-Abo8	46.02	16.25	11.6	4.86	3.49	2.41	0.958	0.666	0.418	0.17	0.1	0.035	0.029	0	0.026	0.022	0	0	99.75

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

لازم به تأکید است که نسبت‌های عنصری حاصل از XRF جایگزین آزمون‌های استاندارد دانه‌بندی نبوده و صرفاً به‌عنوان قرینه‌ای غیرمستقیم برای تفسیر سهم فازهای سیلیسی در برابر فازهای رسی به کار رفته‌اند. تشخیص دقیق نوع خاک و توزیع اندازه دانه‌ها مستلزم انجام آزمون‌های ژئوتکنیکی دانه‌بندی است که به دلیل ماهیت تاریخی نمونه‌ها در این پژوهش امکان‌پذیر نبوده است. با این حال، هم‌خوانی مقادیر بالای SiO_2 با شناسایی کوارتز در XRD و زمینه زمین‌شناسی آبرفتی منطقه، مؤید نقش مؤثر بخش سیلیسی در رفتار مکانیکی و دوام نسبی خشت‌هاست.

– کلسیم(CaO) : وجود CaO با میزان ۹–۱۸ درصد در بدنه خشت های مورد مطالعه، نشان می دهد که این ترکیب عمدتاً از کربنات‌ها (کلسیت/آراگونیت) و بخشی از آن از خاک‌های آهکی رسوبی ناشی شده است. نسبت SiO_2/CaO حدود ۳–۴:۱ است؛ این نسبت بیانگر تعادل بین مقاومت مکانیکی (سیلیس) و قابلیت واکنش شیمیایی (کربنات) است. کربنات‌ها در ابتدا باعث افزایش انسجام و چسبندگی خشت می‌شوند، اما در حضور رطوبت و نمک‌ها، ممکن است واکنش‌های آهکی–سولفاتی ایجاد کرده و ترک‌های ریز در خشت ها را توسعه دهند (Houben & Guillaud, 1994; Torraca, 2009).

– آلومینیوم(Al_2O_3) : در ترکیب بدنه خشت‌ها در بازه ۹ تا ۱۱ درصد اندازه‌گیری شده است که بیانگر حضور کلی فازهای آلومینوسیلیکاته در خاک مورد استفاده است. این مقدار با حضور فازهای رسی شناسایی‌شده در آنالیز پراش‌سنجی پرتو ایکس (XRD)، از جمله مونت‌موریلونیت و کانی‌های ورقه‌ای پایدار، همخوانی دارد. مقادیر Al_2O_3 حاصل از آنالیز XRF به‌تنهایی مبنای شناسایی نوع کانی‌های رسی نیست و در این پژوهش صرفاً به‌عنوان داده‌ای تکمیلی برای تفسیر ترکیب کلی بدنه خشت‌ها به کار رفته است. نسبت Al_2O_3/SiO_2حدود ۰.۲–۰.۳ است که برای حفظ پلاستیک بودن و قابلیت شکل‌دهی خشت کاملا مناسب است. این نسبت به تعادل بین قابلیت قالب‌گیری و مقاومت مکانیکی خشت ها کمک می‌کند؛ مقادیر بالاتر Al_2O_3 باعث افزایش پلاستیسیتی و کاهش ترک‌خوردگی در هنگام خشک شدن خشت می‌شود، در حالی که مقادیر کم می‌تواند خشت را شکننده کند (Heathcote, 2011; Minke, 2012).

– آهن و تیتانیوم (Fe_2O_3وTiO_2): میزان Fe_2O_3 (۳–۵) وTiO_2 (۰.۲–۱.۲) درصد است که می تواند نشان دهنده منشأ رسوبی–آبرفتی خاک مورد استفاده در تهیه خشت ها باشد که میتوان آن را غالباً با انتقال مواد از ارتفاعات هندوکش و رسوبات طبیعی دشت سیستان مرتبط دانست. Fe_2O_3 علاوه بر اثر رنگ‌دهی، مقاومت در برابر فرسایش را نیز افزایش می‌دهد، زیرا اکسید آهن نقش تقویتی در ماتریس رسی خشت دارد (Walker, 1979; Hall & Djerbib, 2004).

– فلزات قلیایی و قلیایی خاکی (K_2OوNa_2O): این عناصر با مقادیر ۱–۲ درصد در ترکیب بدنه خشت ها، نشان‌دهنده حضور کانی‌های رسی ایلیتی و حساسیت متوسط به مهاجرت نمک‌ها و واکنش‌های قلیایی است. نسبت K_2O/Na_2Oتقریباً ۱:۱ است که تعادل یون‌های قلیایی را نشان می‌دهد و می‌تواند بر پلاستیسیتی و واکنش‌پذیری خشت در شرایط مرطوب اثرگذار باشد(Doat et al., 1990; Torraca, 2009).

– سولفات‌ها (SO_3) : مقادیر آن در خشت ها بین ۰.۱۵–۰.۴۵ درصد است که ناشی از وجود ژیپس طبیعی یا سولفات‌های محلول است که در چرخه انحلال–تبلور می‌تواند باعث توسعه ترک‌های سطحی در خشت ها گردد (Goudie & Viles, 1997; Hall & Djerbib, 2004).

– LOI(از ۱۲ تا ۲۸٪) که نمایانگر مقدار مواد فرار شامل کربنات‌ها، آب جذب‌شده و ترکیبات آلی موجود در خشت است. مواد آلی، بقایای گیاهی و جانوری علاوه بر اثر مثبت در شکل‌پذیری، باعث کاهش مقاومت و دوام خشت در بلندمدت می‌شوند(Heathcote, 2011; Walker, 1979).

لازم به تأکید است که مقدار LOI در خشت‌های تاریخی صرفاً به تجزیه کربنات کلسیم محدود نمی‌شود، بلکه می‌تواند شامل افت وزن ناشی از دهیدراسیون کانی‌های رسی، خروج آب ساختاری ژیپس و تبخیر رطوبت جذب‌شده نیز باشد. از این رو، عدم تطابق خطی میان درصد $CaCO_3$ و LOI، به‌ویژه در نمونه‌هایی نظیر نمونه ۸، بازتاب‌دهنده ماهیت ناهمگن و چندفازی بدنه خشت‌هاست. این رفتار در مطالعات مصالح خشتی و رسوبات آبرفتی آهکی پدیده‌ای شناخته‌شده محسوب می‌شود.

–تحلیل نسبت عناصر و روابط بین آن‌ها: بررسی نتایج حاصل از آنالیز ترکیب شیمیایی بدنه خشت ها و نسبت میان عناصر و ترکیبات مختلف تشکیل دهنده آن، حاکی از آن است که نسبت SiO_2/CaO حدود ۳–۴:۱ است که نشان‌دهنده تعادل مطلوب بین مقاومت مکانیکی و ریسک واکنش آهکی–سولفاتی است. نسبت Al_2O_3/SiO_2 نیز حدود ۰.۲–۰.۳ است که پلاستیسیتی کافی و قابلیت شکل‌دهی خشت را تضمین می‌کند. این در حالی است که نسبت CaO/SO_3 بالاتر از ۳۰ به ۱ است که بدین ترتیب می توان گفت که در شرایط خشک منطقه سیستان، خطر سولفات پایین است اما در حضور رطوبت، چرخه‌های ژیپس‌سازی محلی رخ می‌دهد.

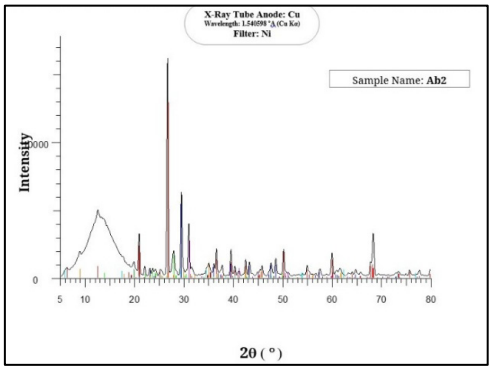
در یک جمع بندی کلی از نتایج بدست آمده حاصل از آنالیز بدنه خشت ها به روش فلورسانس پرتوی ایکس می توان گفت که خشت‌ها از خاک‌های ناهمگن چند پهنه رسوبی تهیه شده‌اند که منجر به ناهمگنی جزئی در خواص مکانیکی و دوام آن ها شده است. ترکیب سیلیس بالا و نسبت متعادل Al_2O_3/SiO_2باعث مقاومت مکانیکی و شکل‌پذیری مطلوب در خشت ها است و وجود کربنات‌ها و سولفات‌ها علاوه بر نقش تقویتی اولیه، در شرایط مرطوب می‌تواند موجب تخریب آهکی–سولفاتی آنها شود. از سوی دیگر مواد

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

آلی و LOI بالا پتانسیل آسیب‌پذیری در برابر تغییرات رطوبت و دما را در خشت ها افزایش می‌دهد.بنابراین برای مرمت و حفاظت، کنترل رطوبت، مدیریت مهاجرت نمک‌ها و انتخاب خاک با ترکیب مشابه برای تولید خشت‌های مرمتی ضروری است. که بدین ترتیب تعیین نسبت دقیق عناصر و شناخت کانی‌ها، امکان بهینه‌سازی ترکیب خاک برای افزایش دوام و مقاومت مکانیکی خشت‌های مرمتی را فراهم می‌کند.

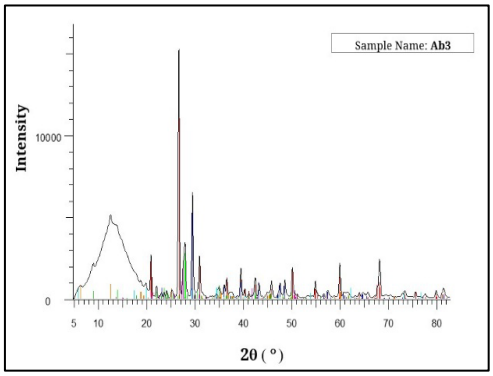
٤-٥. مطالعهٔ ساختاری و شناسایی ترکیب کانی شناختی بدنه خشت ها به روش پراش پرتوی ایکس (XRD)

شناسایی ترکیب کانی‌شناختی خشت‌های تاریخی از طریق پراش پرتوی ایکس (XRD)، ابزاری کلیدی در تحلیل ساختاری و ژئوتکنیکی مصالح گلی به‌شمار می‌آید. این روش قادر است فازهای معدنی موجود در بدنه خشت، را با دقت بالا مشخص کند و امکان تمایز بین فازهای پایدار و ناپایدار را فراهم سازد(جدول ۶). اطلاعات به‌دست‌آمده از پراش سنجی نه‌تنها برای درک رفتار مکانیکی و روند فرسایش خشت ها در بنای تاریخی مورد نظر اهمیت دارد، بلکه به تحلیل ساختار داخلی خشت، منشأ مواد اولیه و منابع خاک مورد استفاده نیز کمک می‌کند. شناخت دقیق فازهای معدنی، امکان پیش‌بینی واکنش‌های شیمیایی خشت را در شرایط محیطی مختلف و طراحی راهکارهای حفاظتی و درمانی متناسب با ترکیب واقعی آن را فراهم می‌سازد. از این منظر، آنالیز بدنه خشت ها به روش دستگاهی پراش سنجی به عنوان یک ابزار تحلیلی مهم، پایه‌ای علمی برای تصمیم‌گیری‌های مرمتی و افزایش دوام بلندمدت بناهای تاریخی خشتی ارائه می‌دهد و نقش مهمی در ارتقای کیفیت مطالعات حفاظت و مرمت مصالح سنتی ایفا می‌کند. در این پژوهش، از بدنه ۶ نمونه از خشت های منطقه مورد مطالعه، به مقدار بسیار کمی نمونه برداری گردید و نمونه ها به روش پراش سنجی پودری مورد آنالیز فازی قرار گرفت که نتایج بدست آمده از طیف سنجی پرتوی ایکس این نمونه‌ها در اشکال ۱۳-۸ و جدول ۶ به شرح زیر آمده است.



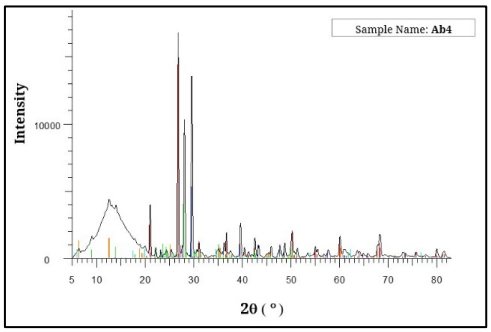
شکل ۸. طیف پراش سنجی بدنه خشت BD-1399-Ab02

Figure 8. X-ray Diffraction Spectrum of the Adobe Body BD-1399-Ab02



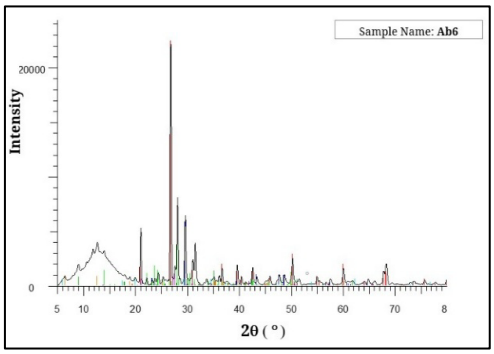
شکل ۹. طیف پراش سنجی بدنهٔ خشت BD-1399-Ab03

Figure 9. X-ray Diffraction Spectrum of the Adobe Body BD-1399-Ab03



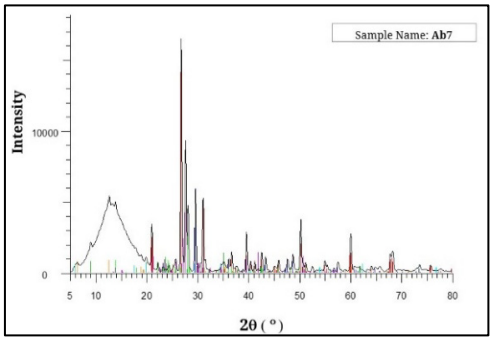
شکل ۱۰. طیف پراش سنجی بدنهٔ خشت BD-1399-Ab04

Figure 10. X-ray Diffraction Spectrum of the Adobe Body BD-1399-Ab04



شکل ۱۱. طیف پراش سنجی بدنهٔ خشت BD-1399-Ab06

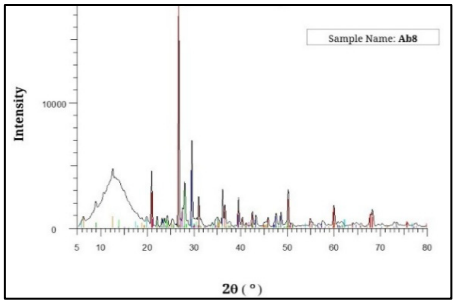
Figure 11. X-ray Diffraction Spectrum of the Adobe Body BD-1399-Ab06



شکل ۱۲. طیف پراش سنجی بدنهٔ خشت BD-1399-Ab07

Figure 12. X-ray Diffraction Spectrum of the Adobe Body BD-1399-Ab07

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026



شکل ۱۳. طیف پراش سنجی بدنهٔ خشت BD-1399-Ab08

Figure 13. X-ray Diffraction Spectrum of the Adobe Body BD-1399-Ab08

بررسی نتایج حاصل از مطالعه ساختاری بدنه خشت های تاریخی به روش پراش سنجی نشان داد که خاک مورد استفاده برای تهیه خشت ها از یک مجموعه رسوبی آبرفتی–کربناته ناهمگن تهیه شده‌اند: حضور غالب کوارتز همراه با آلبیت و میکروکین (فلدسپات‌ها) گویای سهم قابل‌توجه سیلیسی–شنی در مخلوط خاک (تقویت مکانیکی و مقاومت در برابر سایش) است، در حالی که کلسیت و دولومیت نشان‌دهنده ورودی کربنات‌ها (منشاء سنگ آهکی یا لایمستون یا افزودنی آهکی) بوده است. حضور بارز کلسیت و دولومیت نشان‌دهنده سهم قابل توجه فازهای آهکی در تثبیت و افزایش مقاومت مکانیکی بدنه خشت‌ها است. حضور همزمان مسکوویت، کلینوکلور و مونت‌موریلونیت در نمونه‌ها (جدول ۶)، نشان‌دهنده تنوع کانی‌شناسی فاز رسی است، با این تفاوت که این کانی‌ها از نظر فراوانی، منشأ و نقش فنی در خشت، هم‌سطح و هم‌ارزش نیستند. مسکوویت و کلینوکلور به‌عنوان کانی‌های ورقه‌ای پایدار، عمدتاً بازتاب‌دهنده منبع رسوبی با منشأ متامورفیک کم‌درجه (نظیر شیست‌ها و فیلیت‌ها) هستند و نقش آن‌ها در خشت بیشتر به‌صورت پرکننده‌های غیرمتورم‌شونده و افزایش پایداری ابعادی قابل تفسیر است. در مقابل، مونت‌موریلونیت به‌عنوان کانی رسی ثانویه و متورم‌شونده، حتی در مقادیر کمتر، تأثیر غالبی بر رفتار فیزیکی خشت دارد؛ به‌ویژه از طریق ظرفیت بالای تبادل کاتیونی، جذب آب و واکنش شدید به چرخه‌های تر–خشک، که می‌تواند موجب افزایش تخلخل مؤثر، کاهش انسجام مکانیکی و ایجاد ترک‌های موئینه شود. این ناهمگنی کانی‌شناسی، همراه با داده‌های شیمیایی، نشان می‌دهد خاک مصرفی از پهنه‌های مختلف برداشت شده است (شامل نواحی ماسه‌ای–رسی و عدسی‌های کربناته) و پیش از قالب‌گیری خشت، تنها خردشدگی و اختلاط سنتی بر روی آن انجام شده و فرآوری یکنواخت و کنترل‌شده‌ای صورت نگرفته است. بنابراین، اگرچه مسکوویت و کلینوکلور از نظر فراوانی می‌توانند فازهای زمینه‌ای محسوب شوند، رفتار مهندسی و آسیب‌پذیری خشت‌ها عمدتاً تحت تأثیر حضور مونت‌موریلونیت قرار دارد. همچنین حضور فلدسپات‌های نسبی می‌تواند منشأ آبرفتی نزدیک (حوضه بازالتی یا گرانیتی دوردست) را نشان دهد که با حمل و رسوب مجدد در دشت تلفیق شده‌اند. از منظر فناوری تولید، ترکیب‌های مشاهده‌شده مناسب شکل‌دهی دستی (به‌خاطر رسها و سیلیس) است اما برای دوام، نیازمند کنترل رطوبت و مدیریت نمک‌ها است؛ از منظر حفاظت و مرمت، اولویت‌ها عبارتند از: پیشگیری از صعود موئینه و نفوذ رطوبت، حذف یا کنترل نمک‌های محلول پیش از هر اقدام تحکیمی، استفاده از مواد تحکیمی سازگار (ملات‌های هیدرولیکی یا آهکی با ترکیب نزدیک به بدنه به‌جای سیمان پرتلند) و انجام آزمایش‌های پیشرونده سازگاری پیش از هر درمان نفوذی است. در مجموع، آنالیز پراش سنجی بدنه خشت ها نشان می‌دهد که منشأ خاک مورد استفاده برای تهیه این خشت‌ها، احتمالاً محلی و ناهمگن است و رفتار دوام خشت‌ها عمدتاً تابع نسبت سیلیس به کربنات و میزان رس و وضعیت رطوبتی محیط خواهد بود.

بررسی ساختاری خشت‌های تاریخی به روش پراش سنجی اشعه ایکس (XRD) و تحلیل ترکیب شیمیایی با فلورسانس پرتو ایکس (XRF) نشان می‌دهد که خاک مورد استفاده برای تهیه این خشت‌ها از پهنه‌های آبرفتی–کربناته ناهمگن استخراج شده است. نتایج XRF بیانگر مقدار بالای سیلیس (٪SiO_2: 38–46)، کلسیم (٪CaO: 9–18) و مواد فرّار (٪LOI: 12–28) است، که حضور فازهای کوارتز و فلدسپات‌ها (آلبیت و میکروکین) در XRD را تأیید می‌کند. این ترکیب، نشان‌دهنده سهم قابل توجه بخش سیلیسی–شنی در خاک است که مقاومت مکانیکی و سختی سطحی خشت را افزایش می‌دهد و توانایی آن در تحمل سایش و بارگذاری کوتاه‌مدت را تقویت می‌کند. از سوی دیگر مقدار بالای LOI در کنار CaO بالا، وجود فازهای کربناته و اجزای رسی آب‌دوست را تأیید می‌کند، اما به‌تنهایی امکان تفکیک منشأ کلسیم (کربنات‌های طبیعی خاک یا افزودنی انسانی احتمالی) را فراهم نمی‌سازد.

حضور همزمان مسکوویت، کلینوکلور و مونت‌موریلونیت در نمونه‌ها (جدول ۶)، نشان‌دهنده تنوع کانی‌شناسی فاز رسی است، با این تفاوت که این کانی‌ها از نظر فراوانی، منشأ و نقش فنی در خشت، هم‌سطح و هم‌ارزش نیستند. مسکوویت و کلینوکلور به‌عنوان کانی‌های ورقه‌ای پایدار، عمدتاً بازتاب‌دهنده منبع رسوبی با منشأ متامورفیک کم‌درجه (نظیر شیست‌ها و فیلیت‌ها) هستند و نقش آن‌ها در خشت بیش‌تر به صورت پرکننده‌های غیرمتورم‌شونده و افزایش پایداری ابعادی قابل تفسیر است. در مقابل، مونت موریلونیت به‌عنوان کانی رسی ثانویه و متورم‌شونده، حتی در مقادیر کم‌تر، تأثیر غالبی بر رفتار فیزیکی خشت دارد؛ به‌ویژه از طریق ظرفیت بالای تبادل کاتیونی، جذب آب و واکنش شدید به چرخه‌های تر–خشک، که می‌تواند موجب افزایش تخلخل مؤثر، کاهش انسجام مکانیکی و ایجاد ترک‌های موئینه شود. این ناهمگنی کانی‌شناسی، همراه با داده‌های شیمیایی، نشان می‌دهد خاک مصرفی از پهنه‌های مختلف برداشت شده است (شامل نواحی ماسه‌ای–رسی و عدسی‌های کربناته) و پیش از قالب‌گیری خشت، تنها خردشدگی و اختلاط سنتی بر روی آن انجام شده و فرآوری یکنواخت و کنترل‌شده‌ای صورت نگرفته است. بنابراین، اگرچه مسکوویت و کلینوکلور از نظر فراوانی می‌توانند فازهای زمینه‌ای محسوب شوند، رفتار مهندسی و آسیب‌پذیری خشت‌ها عمدتاً تحت تأثیر حضور مونت‌موریلونیت قرار دارد.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

جدول ٦. نتایج آنالیز بدنهٔ خشت‌های تاریخی به روش XRD

Table 6. The results of the body analysis of the Slip-painted pottery samples by XRD method

Adobe No	Mineralogical composition and identified phases	Formula
BD-1399-Abo2	Quartz	SiO_2
	Calcite	$CaCO_3$
	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$
	Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$
	Clinochlore-1 ITMIIb-4 RG	$Mg_5Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
	Muscovite	$H_2KAl_3(SiO4)_3$
	Montmorillonite	$Si_{3.74}A_{l2.03}Fe_{0.03}Mg_{0.02}\cdot O_{11}$
BD-1399-Abo3	Quartz	SiO_2
	Calcite	$CaCO_3$
	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$
	Microcline, intermediate	$CaMg(CO_3)_2$
	Dolomite	$Mg_5Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
	Clinochlore-1 ITMIIb-4 RG	$H_2KAl_3(SiO4)_3$
	Muscovite	$Si_{3.74}A_{l2.03}Fe_{0.03}Mg_{0.02}\cdot O_{11}$
	Montmorillonite	
BD-1399-Abo4	Quartz	SiO_2
	Calcite	$CaCO_3$
	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$
	Microcline, intermediate	$CaMg(CO_3)_2$
	Dolomite	$Mg_5Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
	Clinochlore-1 ITMIIb-4 RG	$H_2KAl_3(SiO4)_3$
	Muscovite	$Si_{3.74}A_{l2.03}Fe_{0.03}Mg_{0.02}\cdot O_{11}$
	Montmorillonite	
BD-1399-Abo6	Quartz	SiO_2
	Calcite	$CaCO_3$
	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$
	Microcline, intermediate	$CaMg(CO_3)_2$
	Dolomite	$Mg_5Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
	Clinochlore-1 ITMIIb-4 RG	$H_2KAl_3(SiO4)_3$
	Muscovite	$Si_{3.74}A_{l2.03}Fe_{0.03}Mg_{0.02}\cdot O_{11}$
	Montmorillonite	
BD-1399-Abo7	Quartz	SiO_2
	Calcite	$CaCO_3$
	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$
	Microcline, intermediate	$CaMg(CO_3)_2$
	Dolomite	$Mg_5Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
	Clinochlore-1 ITMIIb-4 RG	$H_2KAl_3(SiO4)_3$
	Muscovite	$Si_{3.74}A_{l2.03}Fe_{0.03}Mg_{0.02}\cdot O_{11}$
	Montmorillonite	
BD-1399-Abo8	Quartz	SiO_2
	Calcite	$CaCO_3$
	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$
	Microcline, intermediate	$CaMg(CO_3)_2$
	Dolomite	$Mg_5Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
	Clinochlore-1 ITMIIb-4 RG	$H_2KAl_3(SiO_4)_3$
	Muscovite	$Si_{3.74}A_{l2.03}Fe_{0.03}Mg_{0.02}\cdot O_{11}$
	Montmorillonite	

از دیدگاه دوام و حفاظت، حضور مونت‌موریلونیت مهم‌ترین عامل آسیب‌پذیری خشت‌ها محسوب می‌شود، زیرا تورم و انقباض مکرر این کانی در اثر تغییرات رطوبتی، تنش‌های داخلی ایجاد کرده و به گسترش ترک‌های ریز، افت چسبندگی دانه‌ها و تسریع فرسایش سطحی می‌انجامد. در مقابل، مسکوویت و کلینوکلور به دلیل پایداری ساختاری و عدم تورم، می‌توانند تا حدی نقش تعدیل‌کننده داشته و از تغییر شکل شدید خشت جلوگیری کنند، هرچند توانایی آن‌ها برای مهار اثرات منفی مونت‌موریلونیت محدود است. بنابراین، رفتار مکانیکی و الگوی تخریب خشت‌ها نه صرفاً تابع حضور کانی‌های رسی، بلکه تابع نسبت و برهم‌کنش میان فازهای پایدار (مسکوویت و کلینوکلور) و فاز متورم‌شونده (مونت‌موریلونیت) است؛ موضوعی که باید در انتخاب مصالح مرمتی و کنترل رطوبت محیطی به‌طور ویژه مدنظر قرار گیرد.

شناسایی کلسیت و دولومیت در تمامی نمونه‌ها نشان‌دهنده حضور فراگیر فازهای کربناته در ترکیب خشت‌هاست، با این حال، به دلیل ماهیت نیمه‌کمی XRD و عدم انجام تحلیل‌های تکمیلی (نظیر آنالیز ایزوتوپی، پتروگرافی مقطع

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

نازک یا تعیین نسبت کمی کلسیت/دولومیت)، منشأ دقیق این کربنات‌ها اعم از منشأ طبیعی آبرفتی–کربناته یا افزودن آگاهانه مواد آهکی در فرآیند ساخت قابل تفکیک قطعی نیست. همچنین نسبت کلسیت به دولومیت، که می‌تواند شاخص مهمی برای تشخیص منبع رسوبی در برابر افزودنی انسانی و نیز ارزیابی واکنش‌پذیری آهکی خشت باشد، در چارچوب داده‌های موجود قابل تعیین دقیق نیست و نیازمند روش‌های کمی پیشرفته‌تر است.

با وجود این محدودیت ها، هم‌زمانی CaO و LOI زیاد با حضور کلسیت و دولومیت، به‌طور معنادار نشان می‌دهد که فاز کربناته نقش مهمی در رفتار اولیه خشت، از جمله افزایش شکل‌پذیری و بهبود انسجام اولیه، ایفا کرده است. در مقابل، پایداری بلندمدت این خشت‌ها بیش از آن‌که به صرف حضور کربنات‌ها وابسته باشد، تحت تأثیر برهم‌کنش آن‌ها با فازهای رسی به‌ویژه مونت‌موریلونیت و شرایط رطوبتی محیط قرار دارد.فلدسپات‌های آلبیت و میکروکین علاوه بر تقویت انسجام و سختی سطحی، نشان‌دهنده منابع آبرفتی و متامورفیک دوردست خاک هستند که پس از خرد شدن و اختلاط سنتی در خشت ترکیب شده‌اند. تحلیل نتایج بدست آمده از آنالیزهای XRF و XRD نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی و معدنی خشت‌ها با نسبت‌های بالا SiO_2/Al_2O_3 و CaO/کربنات‌ها، به شکل‌پذیری مناسب و مقاومت مکانیکی اولیه منجر شده است، اما دوام بلندمدت آن‌ها تحت تأثیر مونت‌موریلونیت و چرخه‌های رطوبت–خشک است و بدون کنترل رطوبت و مدیریت نمک‌ها ممکن است منجر به کاهش انسجام و توسعه ترک‌های سطحی در خشت ها گردد.

نتیجه‌گیری کلی این است که منشأ خاک خشت‌های تاریخی عمدتاً محلی و ناهمگن بوده و رفتار مکانیکی و دوام آن‌ها تابع نسبت ترکیب سیلیس به کربنات، میزان فازهای رسی و وضعیت رطوبتی محیط است. از منظر حفاظت و مرمت، ضروری است نفوذ رطوبت کنترل شده، صعود موئینه و تجمع نمک‌های محلول پیش از هر اقدام تحکیمی حذف شوند و ملات‌های اصلاح‌شده با ترکیب شیمیایی نزدیک به بدنه خشت (ملات آهکی یا هیدرولیکی سازگار) به کار گرفته شوند. علاوه بر این، انجام آزمون‌های پیشرونده تورم و چرخه‌های مرطوب–خشک قبل از هر درمان نفوذی، برای ارزیابی رفتار واقعی خشت و تضمین دوام مرمت توصیه می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش که بر پایه آنالیزهایXRD، XRF و اندازه‌گیری افت وزنی (LOI) بر روی خشت‌های تاریخی مکشوفه از منطقه برج افغان در دشت سیستان انجام شد، امکان شناسایی دقیق ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی مواد اولیه به‌کاررفته در ساخت این خشت‌ها را فراهم نمود. داده‌های پراش پرتو ایکس حضور فازهای کانی‌شناسی اصلی شامل کوارتز، فلدسپات‌ها، کلسیت، دولومیت، مسکویت، کلینوکلور و مونت‌موریلونیت را نشان داد که بیانگر استفاده از خاک‌های طبیعی با ترکیب رسی–سیلتی و منشأ آبرفتی است.

نتایج آنالیز XRF نیز غلبه SiO_2 و CaO را در ترکیب شیمیایی نمونه‌ها تأیید کرد که با داده‌های کانی‌شناسی هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده سهم بالای فازهای سیلیکاته و کربناته در ساختار خشت‌هاست. مقادیر متغیر کربنات کلسیم (در بازه ۹ تا ۴۰ درصد) و حضور سولفات کلسیم در مقادیر کم تا متوسط (۰٫۲۶ تا ۱٫۴ درصد)، بیانگر ناهمگنی ترکیب اولیه خاک‌های مورد استفاده است. نتایج LOIنیز این تغییرپذیری ترکیب را از نظر اجزای فرّار و کربناته تأیید می‌کند.

برآیند این داده‌ها نشان می‌دهد که خشت‌های تاریخی منطقه برج افغان با حداقل فرآوری و مستقیماً از منابع خاک محلی ساخته شده‌اند و تنوع مشاهده‌شده در ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی آن‌ها بازتابی از ناهمگنی طبیعی رسوبات آبرفتی دشت سیستان است. این پژوهش با ارائه مجموعه‌ای منسجم از داده‌های شیمیایی و کانی‌شناسی، مبنای مستندی برای شناخت مواد اولیه خشت‌های تاریخی منطقه فراهم می‌آورد و می‌تواند به‌عنوان مرجع پایه برای مطالعات تطبیقی بعدی در زمینه خشت‌های تاریخی سایر مناطق ایران مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری: نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند که از همکاری مدیر اسبق ادارهٔ میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی شهرستان زابل، جناب آقای مهندس کیخا آریا، تشکر و قدردانی نمایند. علاوه بر این، بدین وسیله از کمک و یاری همکار ارجمند و گرامی، جناب آقای مهندس رضا خنجری عضو هیات علمی دانشگاه زابل، صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

مشارکت نویسندگان: نویسندهٔ اول بیش‌ترین سهم را در نگارش، پژوهش و تنظیم این مقاله به عهده داشته است که شامل ایده پردازی، روش‌شناسی پژوهش، تحقیق و بررسی، مطالعهٔ مفاهیم و طراحی مقاله، جمع آوری و تحلیل داده‌ها، تهیهٔ نسخه اصلی و تنظیم ساختار مقاله است. نویسندهٔ دوم نیز مدیریت و جمع‌آوری داده‌ها، تصویرسازی داده‌ها، پیگیری اموراداری و انجام برخی از مطالعات و آزمایشات را به عهده داشته است.

تأمین مالی: این پژوهش هیچ‌گونه بودجهٔ داخلی و خارجی دریافت نکرده است.

تضاد منافع: هیچ‌گونه تضاد منافعی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

دسترسی به داده ها و مواد: دسترسی به داده های مقاله امکان پذیر می باشد و در صورت .درخواست از نویسنده مسئول از طریق ایمیل در دسترس قرار خواهد گرفت

References

Alavéz-Ramírez., R, Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., & Gochi-Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. Construction and Building Materials, 34, 296-305.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

Ascensao, G., Pereira, J., Fonseca, J., Costa, A., Ferreira, V. M., & Paiva, H. (2025). Reviving heritage with contemporary solutions for adobe wall rehabilitation. Construction and Building Materials, 458, 139557.

Bater M, Serajii F. (2022). Studies on the Body Structure of the Islaim Period Slip-painted Pottery Shards of Sistan. JRA. 8(2), 47-64. [in Persian]

Bater, M. and Serajii, F. (2023). Identification of the Chemical Composition of the Slip Coating and the Colors Used in Some Slip-painted Pottery from the Sistan Region. Journal of Studies in Color World, 13(3), 269-282. [in Persian]

Bater M, Ahmadi H, Abedi Koupai J, Emadi R. The Effect of Curing Time on Compressive and Tensile Strength of Traditional Kahgel. Journal of Housing and Rural Environment. 2017 Jun 10;36(157):69-86. [in Persian]

Behboodi, N., & Zohreh, . (2020). Investigating the Architectural Adaptation of the Kharkhaneh Chamber of Machi Castle (Safavid Period) ... Iranian Archaeological Research Journal, 10(24), 187–205.

Calatan, Gabriela, G., Hegyi, A., Dico, C., & Mircea, C. (2016). Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks. Procedia Technology, 22, 259-265.

Corrêa, Andréa Aparecida Ribeiro, Lourival Marin Mendes, Normando Perazzo Barbosa, Thiago de Paula Protásio, Nathalia de Aguiar Campos, & Gustavo Henrique Denzin Tonoli. (2015). Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes. Construction and Building Materials, 98, 250-256.

Charola, A. E. (2000). Salts in the deterioration of porous materials: An overview. Journal of the American Institute for Conservation, 39(3), 327–343.

Charola, A. E., Pühringer, J., & Steiger, M. (2007). Gypsum: A review of its role in the deterioration of building materials. Environmental Gology, 52(2), 339–352

Davtalab, J. (2021). A Study of the Architecture and Urban … (Dahaneh-e Gholaman). Journal of Sistan and Baluchistan Studies.

Demay, L., Péan, S., & Patou-Mathis, M. (2012). "Mammoths used as food and building resources by Neanderthals: Zooarchaeological study applied to layer 4, Molodova I (Ukraine)", Quaternary International, 276, 212-226.

Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1990). Construire en terre. Paris: Éditions Alternatives

Eftekhari, N., Holakooei, P., Sayyadshahri, H., & Vaccaro, C. (2018). Four shades of black: Non-invasive scientific studies on the painted potteries from Shahr-i Sokhta, eastern Iran. Journal of Archaeological Science: Reports, 22, 100-107.

Eires, R., Aires Camões, & Said Jalali (2013). Earth architecture: ancient and new methods for durability improvement. ICSA2013-2nd International Conference on Structures and Architecture. CRC Press Taylor & Francis Group, 962-970.

El-Mahllawy, Medhat S., and Ayman M. Kandeel. (2014). Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks. HBRC Journal, 10(1), 82-91.

Farnow, B. (2005). The origins of culture, civilization, and art in ancient Mesopotamia (1st ed.). Sureh Mehr, Tehran. [in Persian]

Gardner, H. (2008). Art through the ages (M. T. Foramarzi, Trans.; 9th ed.). Agah va Negah, Tehran. [in Persian]

Hejazi M, Hashemi M, Jamalinia E, Batavani M. (2015). Effect of Additives on Mechanical Strengths of Adobe Made From Soils of Isfahan. Journal of Housing and Rural Environment, 34 (151), 67-80

Houben, Hugo; Guillaud, Hubert. (1994). Earth Construction: A Comprehensive Guide, Intermediate technology Publications, London.

Ghanimati, S. (2000). New Perspectives on the Chronological and Functional Horizons of Kuh-e Khwaja in Sistan. Iran, 38, 137–150

Goudie, A. S., & Viles, H. A. (1997). Salt weathering hazards. Chichester: John Wiley & Sons.

Hall, M., & Djerbib, Y. (2004). Rammed earth construction. London: BRE Press.

Hadian Dekordi. M (2016). Soil studies of historical and ancient mudbrick materials in various regions of Iran. Athar Quarterly, 37(75), 85-96. in Persian]

Hajirasouliha B, Kiani-DehKiani G, Heidari D, Emami M. (2024). Analysis of the Effect of Soil Properties on the Mechanical Resistance of Historical Mud-Bricks of Yazd. JRA. 10(1), 145-166.

Heathcote, K. (2011). Durability of earthwall buildings. London: Routledge.

Houben, H., & Guillaud, H. (1994). Earth construction: A comprehensive guide. London: Intermediate Technology Publications.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

Majidzadeh, Y. (1997). History and civilization of Mesopotamia, Volume 1: Political history. Markaz-e Nashr-e Daneshgahi, Tehran. [in Persian]

Masoumi, G. R. (2004). History of archaeology. Samt, Tehran. [in Persian]

Malek Shahmirzadi, S. (2011). Mesopotamia in prehistory. Sohban Noor va Ganjineh-ye Naqsh-e Jahan, Tehran. [in Persian]

Mousavi Haji, S. R. (2009). Zahedan-e kohne the abandoned city in sistan. Paazh Publishing, Mashhad.[in Persian]

Mousavi haji. S.R, Mehrafarin. R. and Alaei Moghadam, J. Review the Environmental Characteristics of Historical City of Zahedan-e-Kohne. J Geography and Development. 2011: 79-96. [in Persian]

Minke, G. (2012). Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture. Basel: Birkhäuser.

Miri, N. K., Sarhaddi-Dadian, H., Bahramzadeh, K., & Hashemi-Baghi, M. (2020). Comparison of vulnerability conditions of adobes' structure–the study of historical and restored adobes of Kooh-e Khajeh ancient site (Kohan Dezh castle) in Sistan, Iran. Iran, Materiale şi Cercetări Arheologice, 15, 267-278.

Miqueleiz, L; Ramirez, F; Oti, J.E; Seco, A; Kinuthia, J.M; Oreja, I & Urmeneta, P. (2013). Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production. Engineering Geology, 163, 68–74.

Moradi, H. (2020). Architectural Style and Technique in Prehistoric Sistan: Sustainable Patterns in Shahr-i Sokhta Architecture from Early 3rd Millennium to the Beginning of the 2nd Millennium BC. Ash-Sharq: Bulletin of the Ancient Near East – Archaeological, Historical and Societal Studies, 4, 57–89.

Mousavi Haji, S. R. (2009). Zahedan-e Kohne: The abandoned city in Sistan [Book in Persian]. Mashhad, Iran: Paazh Publications.

Nwankwor, N. A. (2011). Justification for the Combination of Organic and Inorganic Stabilizers to Stabilize Traditional Earth Materials (Mud) for Quality and Capacity Utilization in Africa. In Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage, Getty Publications, 239-246.

Parchebaf motlagh, F. , Alemi, B. and sadeghpour, A. H. (2024). The study of the Characteristics of Clay in Four Historical Monuments in Kashan. Soffeh, 34(4), 107-137. doi: 10.48308/soffeh.2024.105153. [in Persian]

Perrot, J., Le Brun, A., & Labrousse, A. (1971). "Recherches archéologiques à Suse et en Susiane en 1969 et en 1970", Syria 48, 21-51.

Perrot, J. (1981). "L'architecture militaire et palatiale des Achéménides à Suse", in 150 Jahre Deutsches Archäologisches Institut 1829-1979, Internationales Kolloquium, and Mainz: Neue Ergebnisse archäologischer Stadtforschung, 79-94.

Pedram B, Ebrahimi A. (2017). Structural and Physical Characteristics of the Adobe Bricks Used at the World Heritage Site of Arg-e Bam. JRA. 3(2), 81-102. [in Persian]

Rahimnia, R & Heidari Bani, D. (2011). The Effect of Plasticity Index (PI) on the Tensile and Compressive Strength of Cement-Stabilized Adobes for Conservation of Adobe Structures. Journal of conservation studies and cultural sites research, 1 (2), 91-102.

Sharma, Vandna, Hemant K. Vinayak, and Bhanu M. Marwaha (2015). Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. International Journal of Sustainable Built Environment, 4(2), 348-358.

Stronach, D., Roaf, M., & London British Institute of Persian Studies. (2007). Nush-i Jan. 1. The major buildings of the Median settlement. Peeters, London.

Tate, G. P. (1977). Seistan: A memoir on the history, topography, ruins, and people of the country.

Torraca, G. (2009). Lectures on materials science for architectural conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute.

Tohidi M. (2004). Argnameh: Aperspective on the Bam Citadel in the historical context. Kerman Studies Center. [in Persian]
[in Persian]

Walker, P. (1979). Strength and erosion characteristics of earth blocks and earth block masonry. Oxford: Oxford Polytechnic.

Wons, W., Kłosek-Wawrzyn, E., & Rzepa, K. (2025). Corrosion of porous building ceramics caused by double sulphate salt. Materials, 18(5), Article 1041

Zhang, J; Chen, W; Li, Z; Wang, X; Guo, Q & Wang, N. (2015). Study on workability and durability of calcined ginger nuts-based grouts used in anchoring conservation of earthen sites. Journal of Cultural Heritage, 16, 831–837.

Zakavi S, Ebrahimi A. (2023). Provenance studies of the clay used in

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.207]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:42 +0330 on Sunday November 15th 2026

باتر، مسعود، احمدی، حسین، عابدی کوپایی، جهانگیر، و عمادی، رحمت اله. (۱۳۹۶). تأثیر مدت زمان عمل‌آوری ملات سنتی کاهگل بر مقاومت فشاری و کششی آن. مسکن و محیط روستا، (۳۶) ۱۵۷.

باتر مسعود، سراجی فائزه (۱۴۰۱). بررسی و مطالعهٔ ساختاری بدنهٔ سفالینه‌های تاریخی گلابه‌ای منقوش دوران اسلامی سیستان، پژوهه باستان سنجی ۸ (۲) :۴۷-۶۴.

باتر, مسعود و سراجی, فائزه (۱۴۰۲). شناسایی ترکیب شیمیایی پوشش لعاب گلی و رنگ‌های به‌کاررفته در برخی از سفالینه‌های گلابه‌ای منقوش مکشوفه از منطقهٔ سیستان، مطالعات در دنیای رنگ، ۱۳(۳), ۲۶۹-۲۸۲.

پارچه‌باف مطلق، عالمی و صادقپور (۲۰۲۴). مطالعهٔ ویژگی‌های خشت در چهار بنای تاریخی کاشان. صفه, ۳۴ (۴), ۱۰۷-۱۳۷.

پدرام، بهنام و ابراهیمی، افشین (۱۳۹۶). بررسی خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خشت‌های به‌کاررفته در محوطهٔ میراث جهانی ارگ بم، پژوهه باستان سنجی ۳(۲)

توحیدی، محمود (۱۳۸۳)؛ ارگ‌نامه: نگرشی بر ارگ بم در بستر تاریخ، چاپ سوم، کرمان: مرکز کرمان‌شناسی.

حاجی‌رسولی‌ها بردیا؛ ده‌کیانی، غلامرضا؛ حیدری، داریوش و امامی، محمدامین. (۱۴۰۳). تحلیل اثر ویژگی‌های خاک بر مقاومت مکانیکی خشت‌های تاریخی استان یزد، پژوهه باستان سنجی، ۱۰ (۱) :۱۴۵-۱۶۶

ذکوی سهیلا، ابراهیمی افشین (۱۴۰۲). شناسایی منشأ ذخایر رسی خشت‌های ایلامی چغازنبیل در راستای بهینه‌سازی خشت‌های مرمتی، پژوهه باستان سنجی، ۹ (۲) :۱۷۳-۱۹۱.

فرنو، بهروز (۱۳۸۴). منشاء فرهنگ، تمدن و هنر در بین النهرین کهن، چاپ اول، تهران: سورهٔ مهر.

mudbricks from Chogha- Zanbil, Elmite period, on optimization of-mudbricks applied in conservation. JRA. 9(2), 173-191. [in Persian]

گاردنر، هلن (۱۳۸۷). هنر در گذر زمان، ترجمهٔ محمد تقی فرامرزی، چاپ نهم، تهران: آگاه و نگاه.

مجیدزاده، یوسف (۱۳۷۶)؛ تاریخ و تمدن بین النهرین، جلد اول: تاریخ سیاسی، تهران: مرکز نشر دانشگاهی.

معصومی، غلامرضا (۱۳۸۳)؛ تاریخچه علم باستان شناسی، تهران: سمت.

ملک شهمیرزادی، صادق (۱۳۹۰)؛ بین النهرین در دوران پیش از تاریخ، تهران: سبحان نور و گنجینهٔ نقش جهان.

موسوی حاجی، سید رسول (۱۳۸۸). زاهدان کهنه‌شهری خفته در سیستان. مشهد: نشر پاژ.

موسوی حاجی، سید رسول؛ مهرآفرین، رضا و علایی مقدم، جواد. (۱۳۸۹) بررسی ویژگی‌های محیطی شهر تاریخی زاهدان کهنه، فصلنامهٔ جغرافیا و توسعه، ۲۰، ۷۹-۹۶.

هادیان دهکردی (۱۳۹۵). مطالعات خاک‌شناسی مصالح خشتی تاریخی و باستانی در مناطق مختلف ایران. فصلنامهٔ اثر, ۳۷ (۷۵), ۹۶-۸۵.

Bater, M & Rostampour, M. (2025). Structural Study and Chemical Composition Analysis of the Historical Adobe from the Surviving Architectural Structures in the Borj-e Afghan Region of Sistan, *Journal of research on Archaeometry, 11*(2),11207
DOI: 10.66224/jra.2025.11.207