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

Tabriz Islamic Art University

Research Paper

Application of Modern Technologies to Brick Adobe Reinforcement in The Historical Morchekhort Castle of Isfahan

Somayeh Pahlevan [1], **Somayeh Fadaei Nezhad Bahramjerdi** [2,*]

1. M.A, Conservation of Historic Buildings and Urban Fabrics, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran
2. Associate Professor, School of Architecture, College of Fine arts, University of Tehran

* Correspondence: sarafadaei@ut.ac.ir

Abstract

A significant portion of Iran's architectural heritage, spanning from pre-Islamic times to the contemporary period, includes ancient sites, historical urban and rural textures, and valuable individual buildings made of brick and mud. Due to the vulnerable nature of these materials, there is an increasing need for protection, restoration, maintenance, and reinforcement against damaging factors as time progresses and technology advances. On the other hand, the historical Morchekhort Castle, one of the most significant adobe structures in Isfahan, is currently abandoned and uninhabited due to uncertainties regarding its habitation and preservation. Therefore, this research aims to enhance the functional capabilities of materials by making the clay structure of Morchekhort Castle resistant to moisture using modern techniques. It seeks to answer the question: What new techniques are most effective in improving the functional capabilities of materials for reinforcing clay structures against moisture? This research is applied in terms of its purpose, focusing on evaluating new techniques for strengthening clay structures against humidity. The method of collecting information involves fieldwork, library research, and laboratory data analysis. As a result of this research, both modern and traditional techniques have been evaluated to improve the quality of materials. Among the samples produced using modern techniques, code D, which consists of a combination of soil, straw (base adobe), and a synthetic emulsion solution, demonstrated the highest percentage of resistance in the compressive strength test and the lowest percentage of moisture absorption compared to the original adobe. Given its low weight of approximately 0.818 kilograms with dimensions of 10 x 10 x 5 cm, this produced sample can also be more resistant to earthquakes and structural vibrations than the original brick of the same dimensions, which weighs approximately 1,500 kilograms.

Keywords: New techniques, Retrofitting plan, Clay structures, Dealing with humidity, Morchekhort Castle, Isfahan.

Received: 2025/3/23
Revised: 2025/5/14
Accepted: 2025/6/13
Published: 2025/6/30

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

A large part of Iran's architectural heritage from prehistory to the present, whether on a single building scale or in historical sites, consists of clay structures, and according to statistics, more than 17% of the world's population uses buildings made of clay materials (Correia, 2015). The long history of brick architecture in Iran can also increase the potential and quantity of related research, but despite this, it has always faced a shortage or absence of useful and usable resources for the protection, repair, and strengthening of adobe buildings (Rahimnia et al., 2013: 20). In today's changing world, with increasing interest in preserving the architectural heritage of the earth, the need for this vulnerable architecture to be protected and strengthened through intelligent responses to threats from environmental factors has become obvious (Gandia, 2019: 140). This research focuses on moisture damage affecting the erosion of adobe materials and introduces a solution for strengthening the materials with new methods in terms of mechanics and physics. By conducting laboratory studies, it

seeks to introduce alternative brick materials in the restoration of the historical Morchekhort castle to achieve the desired protection to strengthen the clay structure of this ancient site against moisture. It intends to preserve the originality of the original brick in the first step and then propose an optimal brick against moisture and seeks to answer this question: What new techniques can be used to improve the functional capability of materials for the design of resisting clay structures against humidity? This research presents a new mixture for producing brick and compares it with the original brick in terms of compressive and moisture resistance.

Materials and Methods

This research is quantitative and qualitative. The method of collecting information is field-based to investigate the major damages to the structure of the Glin Qaleh, followed by studies of the structural properties of the brick using an experimental method based on laboratory data. The experiments are introduced below.

Results

The physical and mechanical properties of the produced bricks and the comparison of laboratory results were carried out in one of the largest clay structures in the Morchekhort fortress, this was done by adding natural organic materials and synthetic organic materials to the initial clay compositions. In the first step, the produced bricks were subjected to immersion and artificial rain tests to measure the resistance to moisture. Code H with the compositions of soil + straw (base brick) + synthetic fibers (polypropylene) + synthetic emulsion solution and code D with the compositions of soil + straw (base brick) + synthetic emulsion solution had the highest rate of maintaining the appearance and percentage of compaction of the constituent components. Following that, in the selected samples subjected to the compressive strength and permeability percentage test, the highest compressive strength and the highest percentage of moisture resistance are related to code D compared to the original brick, and considering the low weight of this produced sample, it has a resistance of approximately 0.818 kilograms in dimensions of 10*10*5 compared to the original brick of these dimensions with a weight of approximately 1500 kilograms.

Discussion

In this research, first, by measuring and studying the soil of the historical Morchekhort castle, the main and secondary phases of the castle's soil and clay were determined using XRD testing, followed by a soil and clod (clay) grading test to determine the percentage of silt and clay, the percentage of sand, the percentage of sand, and the absence of rubble. By examining the Atterberg limit of the soil and by examining the flow index of the flow limit in the lump and soil, the percentage of additives for the preparation of clay showed that it had no effect on the water absorption and the paste state of the clay and maintained its clay properties. By examining the paste limit of the strength, the percentage of clay components for the soil and the production of low-strength clay was identified.Then, considering the instructions for previously produced brick and the additives introduced in this study, new brick was produced.

Conclusion

In this research, after identifying the components of the soil and the original clay, a new clay was produced by presenting the instructions for previously produced clay and the introduced additives, Immersion and water washing tests were conducted to measure the shape resistance of the produced bricks. In the water washing test, which was measured and evaluated for 5, 10, 20, and 40 minutes, and the immersion test, which was measured and evaluated for 4, 8, 16, and 24 hours in four stages, code H and code D had the highest rate of maintaining the appearance and percentage of compaction of the constituent components, and their durability and disintegration rate were also recorded during the hours before and after Following that, the selected samples were subjected to compressive strength and permeability percentage tests in equipped laboratories in Isfahan. The highest compressive strength was for sample D with the highest applied load at the moment of failure of 1352 (Kgf) and a compressive strength of 43 MPa.And measuring the moisture resistance of these two selected samples compared to the initial sample, which quickly disintegrated. Considering the research emphasis on preserving the primary compositions of Code D brick with the highest level of resistance, including the compositions of soil + straw (base brick) + synthetic emulsion solution, it can be introduced as a proposed moisture-resistant brick. Accordingly, with minimal physical intervention in the produced bricks, a step is taken to increase the compressive strength,The seismic resistance was increased by a high percentage of lightness compared to the original brick and increased resistance to penetrating moisture.

Author Contributions: The first author was responsible for the manuscript's main text composition, conducting various laboratory stages, developing the research methodology, data management, and the final review and editing process. The second author provided supervision, validation, and overall project administration.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The datasets described and/or analyzed during this study are accessible and traceable in the Resources and References section.

Acknowledgments: This article constitutes a section of the research findings from the first author's Master's thesis, titled "Application of Modern Techniques in Reinforcing Earthen Structures Against Moisture: Case Study of Morchekhort Castle, Isfahan." This research was conducted under the supervision of the second author at the College of Fine Arts, University of Tehran. The first author extends their sincere gratitude

to Dr. Somayeh Fadaei Nezhad Bahramjerdi for her valuable guidance throughout this research.

Conflicts of Interest: The author declares no conflicts of interest.

پژوهه باستان سنجی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز

مقاله پژوهشی

کاربست فناوری های نوین بر مقاوم‌سازی خشت در قلعه تاریخی مورچه خورت اصفهان

سمیه پهلوان [۱]، سمیه فدایی نژاد بهرامجردی [۲]*

۱. کارشناسی ارشد، مرمت و احیای ابنیه تاریخی، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران
۲. دانشیار، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران
* مسئول مکاتبات: sarafadaei@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱/۳
آخرین اصلاح: ۱۴۰۴/۲/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲۳
انتشار: ۱۴۰۴/۴/۹

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

چکیده

بخش عظیمی از میراث معماری ایران از دوران پیش از اسلام تا دوره معاصر از جمله محوطه‌های باستانی، بافت‌های تاریخی شهری و روستایی تا تک بناهای ارزشمند دوران مختلف تاریخ، از خشت و گل است و به دلیل ماهیت آسیب‌پذیر این مصالح باگذشت زمان و به‌روزشدن تکنولوژی، ضرورت حفاظت، مرمت، نگهداری و مقاوم‌سازی در برابر عوامل آسیب‌رسان احساس می‌گردد. از طرفی قلعه تاریخی مورچه‌خورت به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین سازه‌های خشتی در اصفهان است که به دلیل عدم اطمینان از سکونت و حفظ جان، امروزه متروکه و خالی از سکنه مانده است. بنابراین این پژوهش درجهت ارتقای قابلیت کارکردی مصالح از طریق مقاوم‌سازی خشت‌های به‌کاررفته در قلعه مورچه‌خورت در برابر رطوبت با استفاده از تکنیک‌های نوین گام برمی‌دارد و به دنبال پاسخ به این است: چه تکنیک‌های نوینی برای ارتقای قابلیت کارکردی خشت جهت مقاوم‌سازی ساختارهای گلین در مقابل رطوبت کارایی بیشتری دارد؟ این پژوهش از نظر هدف یک پژوهش کاربردی است که به دنبال سنجش تکنیک‌های نوین در جهت استحکام‌بخشی سازه‌های گلین در برابر رطوبت است و روش گردآوری اطلاعات به‌صورت میدانی، کتابخانه‌ای و داده‌های آزمایشگاهی صورت می‌پذیرد. در نتیجه، این پژوهش باتوجه‌به تکنیک‌های نوین به کار گرفته شده در بهبود کیفیت مصالح در برابر رطوبت نشان داد که در میان نمونه‌های تولیدی با استفاده از تکنیک‌های نوین کد D با ترکیب خاک + کاه (خشت پایه)+ محلول امولسیون سینتتیک، بالاترین درصد مقاومت در برابر آزمایش مقامت فشاری و درصد رطوبت‌پذیری نسبت به خشت اولیه را دارد و باتوجه‌به وزن کم این نمونه تولید شده در حدوداً ۰.۸۱۸ کیلوگرم و ابعاد ۵*۱۰*۱۰ سانتیمتر، نسبت به خشت اولیه به این ابعاد با وزن حدود ۱۵۰۰ کیلوگرم در برابر رطوبت بیشترین مقاومت را دارا می‌باشد.

واژگان کلیدی: تکنیک‌های نوین، طرح مقاوم‌سازی، ساختارهای گلین، مقابله با رطوبت، قلعه مورچه‌خورت اصفهان

۱. مقدمه

بخش زیادی از میراث معماری جهان از پیش از تاریخ تا کنون چه در مقیاس تک بنا چه در محوطه‌های تاریخی از سازه‌ها گلین تشکیل شده است و طبق آمار بیش از ۱۷ درصد جمعیت جهان از ساختمان‌هایی با مصالح گلی استفاده می‌کنند (Correia , 2015). سابقه طولانی معماری خشتی در ایران، پتانسیل و کمیت پژوهش‌های مرتبط را نیز می‌تواند افزایش دهد، ولی بااین‌وجود همواره با کمبود و یا عدم وجود منابع مفید و قابل‌استفاده برای حفاظت، مرمت و استحکام‌بخشی بناهای خشتی مواجه بوده است (رحیم‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۰). بااین‌حال در سال‌های اخیر با ایجاد مؤسسات علمی (Getty Conservation Institute)، نشست‌هایی در سطوح ملی[۱]، منطقه‌ای، بین‌المللی و جهانی[۲]، نشر آثار علمی[۳]، نگرش و طرز تفکر در مورد اهمیت و ارزش این سازه‌های بومی را دگرگون کرده و لزوم پرداختن به این گنجینه‌های ارزشمند تاریخی را دوچندان کرده است. دنیای در حال تغییر امروزی باعلاقه فزاینده در

https://doi.org/10.61882/jra.2025.11.109

حفظ میراث معمارانه خاکی نیاز این دسته از معماری‌های آسیب‌پذیر به حمایت و تقویت از طریق پاسخ هوشمندانه به تهدیدات حاصل از عوامل محیطی به امری آشکار تبدیل شده است (Gandia, 2019: 140). از طرفی سازه‌های خشتی، با قدمتی هزاران ساله، بخش مهمی از میراث معماری در مناطق گرم و خشک و نیمه‌خشک جهان را تشکیل می‌دهند. در کنار مزایایی چون دردسترس‌بودن مصالح و هماهنگی با اقلیم، اصلی‌ترین چالش این سازه‌ها، آسیب‌پذیری در برابر رطوبت و بارندگی است؛ چرا که نفوذ آب می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری، فرسایش و در نهایت تخریب شود (Pereira et al, 2008). ازاین‌رو، تثبیت خاک برای افزایش دوام و کاهش اثرات مخرب رطوبت همواره دغدغه اصلی پژوهشگران بوده است. مشکل اصلی سازه‌های گلین، عدم دوام در برابر طیف وسیعی از عوامل فرساینده محیطی است و عمده مشکل دررابطه‌با این ساختارهای گلین فروریختگی و فرسایش‌پذیری حاصل از رطوبت است که منحصر به یک منطقه نیست و سراسر ابنیه‌های موجود در جهان به‌خصوص دارای معماری گلین را مورد تهدید قرار می‌دهد. بنابراین باید شیوه‌های نوینی برای حفاظت از این بناهای ارزشمند به کارگرفت که در کنار شیوه‌های سنتی بتواند در بقا و طولانی کردن این ساختارها مثمرثمر باشد. این پژوهش با تمرکز بر آسیب‌های رطوبتی تأثیرگذار جهت فرسایش مصالح خشتی به معرفی راهکار تقویت مصالح با شیوه‌های نوین از لحاظ مکانیکی و فیزیکی می‌پردازد و با انجام مطالعات آزمایشگاهی در پی معرفی مصالح خشتی جایگزین در مرمت قلعه تاریخی مورچه‌خورت برای رسیدن به حفاظت مطلوب جهت مقاوم‌سازی ساختار گلین این محوطه باستانی در برابر رطوبت است و در نظر دارد در گام اول اصالت خشت اولیه حفظ شود و به دنبال آن خشت بهینه در برابر رطوبت را پیشنهاد دهد. این پژوهش جهت رسیدن به این هدف که ارتقای قابلیت کارکردی خشت مصالح ازطریق مقاوم‌سازی سازه‌های گلین قلعه مورچه‌خورت در برابر رطوبت با استفاده از تکنیک‌های نوین است قدم برمی‌دارد و درپی پاسخ به این پرسش است چه تکنیک‌های نوینی جهت ارتقای قابلیت کارکردی خشت در برای مقاوم‌سازی ساختارهای گلین در مقابل رطوبت می‌توان به کارگرفت؟ پژوهش حاضر با روش تجربی و با استفاده از داده های آزمایشگاهی قرار است که در سنجش فرضیات زیر پژوهش گام بردارد؛۱. به نظر می‌رسد اضافه‌کردن محلول رزین امولسیون اکریلیک(تکنیک نوین) نسبت به محلول امولسیون سینتتیک(تکنیک نوین) به مواد اولیه مصالح گلین(تکنیک سنتی) میزان مقاومت در برابر رطوبت را بیشتر افزایش می‌دهد؛ ۲. به نظر می‌رسد الیاف پلی‌پروپیلن(الیاف مصنوعی، تکنیک نوین) به‌جای الیاف گیاهی (کاه، تکنیک سنتی) بر میزان مقاوم‌پذیری مصالح اولیه در برابر رطوبت تأثیرگذار باشد، جهت سنجش و انجام فرضیات و رسیدن به اهداف پژوهش آزمایشات زیر مورد سنجش قرار گرفت.در واقع این پژوهش با ارائه ترکیب جدید برای تولید خشت به مقایسه آن با خشت اولیه از لحاظ میزان مقاومت فشاری و رطوبتی می‌پردازد.

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات علمی زیادی در چند دهه اخیر در سطح بین‌المللی و داخلی در زمینه بررسی و بهبود خواص مکانیکی خشت، تأثیر افزودنی‌های معدنی و طبیعی در تثبیت خاک و مقاوم‌سازی مصالح خشتی صورت پذیرفته است که مهم‌ترین آنها در موارد زیر دسته‌بندی می‌گردد؛ در موردپژوهش‌های مرتبط با بهبود خواص مکانیکی و تقویت ساختار سازه‌ای مؤسسه حفاظت گتی تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام داده است. این مطالعات به ویژه بر مقاومت خشت‌ها در برابر نیروهای زلزله‌ای و روش‌های مقاوم‌سازی مکانیکی بدون آسیب رساندن به ساختار تاریخی تمرکز دارند(Tolles et al, 2008). علاوه بر این، این تحقیقات اهمیت بررسی افزودنی‌ها و مواد تثبیت‌کننده مانند آهک، سیمان و لاتکس طبیعی را در بهبود مقاومت مکانیکی خشت‌ها در برابر رطوبت و افزایش پایداری طولانی‌مدت آن‌ها نشان داده‌اند، که نقش مهمی در حفاظت از میراث خشتی تاریخی ایفا می‌کند(Avrami et al, 2008). Dormohamadi& Rahimnia(2020) بیان کردند که ترکیب تراکم مکانیکی و محتوای رس می‌تواند مقاومت فشاری، کششی و خمشی خشت را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. علاوه بر این، پژوهش‌های Sadeghi et al(2018) به تحلیل عملکرد لرزه‌ای طاق‌های خشتی تاریخی یزد پرداخته شد و بیان کردند که طاق‌های خشتی در برابر بارهای زلزله آسیب‌پذیر هستند و نیاز به تقویت دارندو استفاده از افزودنی‌های طبیعی مانند فیبرهای گندم نیز موردبررسی قرار گرفته و نشان داده که این افزودنی‌ها می‌توانند مقاومت مکانیکی خشت را بهبود بخشند درمحمدی و همکاران(۱۳۹۸)در پژوهش صورت گرفته در اردکان یزدتاکیدکردند که تثبیت مکانیکی و اصلاح دانه‌بندی خاک، رابطه مستقیمی با افزایش مقاومت خشت دارد. مطالعات ذات اکرم&زمانی فرد(۱۳۹۸) بر سیستم‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای و بهبود پایداری ساختمان‌های خشتی روستایی در ایران تمرکز کردند و کاربرد روش‌های تقویتی در شرایط واقعی را بررسی نمودند و حاجی رسولی (۱۴۰۳)، به بررسی ساختار تشکیل‌دهنده خاک و مقاومت مکانیکی

خشـــت‌های تاریخی منطقه یزد پرداخته‌لند، نتایج نشـــان می‌دهد، خشت‌هایی با غالب خاک ریزدانه و مقدار مناسب مواد رسی، مقاومت مکانیکی بهتری در مقابل خشـت‌های با ذرات غالب درشـت‌دانه دارند. به‌طورکلی، این مطالعات نشـــان می‌دهند که اســـتفاده هم‌زمان از روش‌های مکانیکی، افزودنی‌های طبیعی و تکنیک‌های مقاوم‌ســـازی لرزه‌ای می‌تواند به طور مؤثر خواص مکانیکی و دوام خشـــت در ایران را بهبود بخشد.

پژوهشـگرانی به بررسـی افزودنی‌ها معدنی مورداسـتفاده جهت تثبیت و مقاوم‌ســـازی خشـــت پرداخته‌اند. از این میان Walker & Stace(1997)نشـان دادند که اسـتفاده از سـیمان به‌عنوان تثبیت‌کننده می‌تواند مقاومت فشـاری و دوام خشـت را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. در ادامه، Ciancio et al(2013) با تمرکز بر تعیین مقدار بهینه آهک برای تثبیت خاک در بلوک‌های فشـــرده (CSEB) دریافتند که آهک نقش کلیدی در ارتقای دوام بلندمدت و کاهش تغییر شکل‌های ناشـــی از رطوبت دارد. بهرام‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) با افزودن ۰.۲ درصد آهک جهت دستیابی به خشـتی سازگار با شـرایط رطوبتی بالا با درصـد ۰.۲ میزان افزودن آهک را پیشـــنهاد دادند. Silva(2020) به سـنجش میزان رس و ماسـه در جهت جذب آب مویرگی و میزان نرخ خشـک‌شـدن خشـت پرداخته اسـت که درصـد مقاومت مکانیکی و فشـاری خشـت با افزودن این مواد افزایش می‌یابد و با خشـــت‌های مشـابه در مناطق دیگر با درصـد آهک موجود مقایسـه شـده و نتایج نشـــان می‌دهد باتوجه‌به خاک هر منطقه میزان افزودنی‌ها جهت اسـتحکام متفاوت اسـت. باتر(۱۳۹۶) در پژوهش خود بررسـی کرد که اسـتفاده از سـه درصـد وزنی کائولن ۱۵۰میکرون تا ۶۵ درصـد، سـه درصد زئولیت ۴۵ میکرون تا ۸۵ درصد ضریب نفوذپذیری کاهگل را کاهش و خاصیت عایق‌بندی آن را ارتقا می‌دهد، نامور و زرینی(۱۳۹۸) به بررســـی تأثیر ســـیلیکات ســـدیم و اکریلیک بر مقاومت فشـــاری، خمشـــی و رطوبتی ملات کاهگل پرداخته‌اند و نتایج نشـــان دادند که مقاومت کاه‌گل حاوی سیلیکات سدیم با نسبت صددرصد حجمی آب به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که شـــاخص مقاومت در برابر رطوبت، فشـار و خمش کاهگل دارای افزودنی سـیلیکات سـدیم خیلی بیشـتر از کاهگل معمولی اسـت. حسـینی کشـتان (۱۴۰۱) با آگاهی از کیفیت خشـــت مطلوب با راهبرد تجربی میزان مطلوب ماده افزودنی زئولیت جهت نفوذپذیری کم و کاهش فرآیند فرســـایش خشـــت را معرفی کرده‌اســـت. ابراهیمی (۱۳۹۸)با ارائـه نمونـه‌هـای خشـــتی ارتقایافته اذعان داشته که می‌توان خاصیت ضربه‌پذیری خشت‌ها را از حداقل ۱۱۰.۵درصـد تا حداکثر ۳۴۲درصـد، خاصـیت تنش‌پذیری خشـت‌ها را از حداقل ۱۰۱درصـد تا حداکثر ۲۱۴درصـد و خاصـیت لغزش‌پذیری خشـت‌ها را از حداقل ۱۰۲درصـد تا حداکثر ۳۰۰درصـد بهبود بخشد.

وگروهی دیگر مطالعاتی با اسـتفاده از افزودنی‌های طبیعی نیز صـورت‌گرفته اسـت. Gomes et al(2024) با افزودن الیاف piassava[۴]به خشـت نشـان دادند که می‌توان علاوه بر ارتقای مقاومت مکانیکی، از منظر زیسـت‌محیطی نیز به پایداری بیشـتر سـاخت‌وسـاز دسـت‌یافت. به‌عنوان نمونه،Sharma et al(2016) نشـــان دادند که افزودن الیاف گیـاهی نظیر Grewia optiva [۵]و Pinus roxburghii [۶]موجب کـاهش ترک‌خوردگی و افزایش مقاومت خشـت در برابر چرخه‌های مرطوب–خشـک می‌شـود. همچنین، Kasie et al(2025) با بررسـی تأثیر الیاف ســـیســـال گزارش کردند که افزودن کمتر از ۱٪ فیبر باعث افزایش سه‌برابری مقاومت فشاری و بیش از سه‌برابری مقاومت خمشی خشت می‌شـــود.Calatan (2016)، بـا مطـالعـات تجربی و آزمـایشـــگـاهی، تقویت‌کننده‌های فیبر طبیعی در آجر خشـتی برای اسـتحکام مکانیکی خاک را مورد سـنجش قرار داده اسـت، در نتایج نشـان می‌دهد برای مخلوط خاک رس اسـتفاده شـده، افزودن بهینه الیاف کنف، ۹-۱۰٪ و درصد حجمی ۳۰-۴۰ درصد کاه تعیین شـده اسـت Ouedraogo et al(2019) تأثیر نوعی الیاف طبیعی به نام فونیو(Fonio straw)و میزان آن را روی خواص مکانیکی و فیزیکی بلوک‌های خشتی بررسی کردند. محمدی وهمکاران(۱۴۰۱)نشـان می‌دهد افزودن مقدار ۰.۲۵٪ الیاف خرما می‌تواند مقاومت فشـاری خشـت را تا حدود ۵۰٪ و افزودن ۱٪ الیاف مقاومت کششـی آن را تا بیش از ۱۰۰٪ نسـبت به نمونه شـاهد افزایش دهـد. Manaviparast et al(2025) بـا مرور پژوهش‌هـا، کـاربرد خـاکســـتـر پوســـتـه برنج و لجن آهکی را بـه‌عنوان مواد دوســـتـدار محیط‌زیست در تثبیت خاک‌های رسی معرفی کرده‌اند. از سوی دیگر، برخی پژوهش‌ها مانند Sesay et al (2025) نشـــان داده‌لند که تثبیت زیسـتی با اسـتفاده از پلیمرهای طبیعی می‌تواند اسـتحکام سـازه‌های خشتی را بدون تغییر در ظاهر سنتی آنها افزایش دهد و در عین حال اثرات زیسـت‌محیطی محدودی داشـته باشـد.Mihić(2025) در پژوهش خود با آسیب‌شناسی و انجام مطالعات آزمایشگاهی به بررسی میانگین رطوبت دیوارهای خشتی پرداخته و خاک مورد استفاده برای خشت با محتوای شـن متوسـط ۲.۲٪، ۳۷.۹٪ ماسـه، ۴۹.۶٪ سـیلت، و ۱۰.۰٪ رس پیشـــنهاد داده‌اند. جمع بندی پیشـــینه مطالعات انجام شـــده در زمینه تثبیت خاک و مصالح خاکی و خواص آن حاکی از این است که بیشـــتر پژوهش های صـــورت پذیرفته در جهت تغییر در ترکیبات خشـت و مصالح خاکی در جهت بهینه سازی ساخت و ساز و مرمت

معماری خاکی صورت پذیرفته است و به حفظ ترکیبات اولیه بدون ترکیب جایگزین کمتر توجه شده است، این پژوهش با حفظ ترکیبات اولیه خشت سعی در سنجش و به کارگیری افزودنی های نوین بدون ترکیبات جایگزین برای خشت و معماری خاکی جهت مقابله با رطوبت دارد که با استفاده از مواد طبیعی آلی و مواد مصنوعی آلی در این زمینه جهت بررسی خشت‌های تولیدی قدم بر می‌دارد.

در دسته‌بندی بعدی به بررسی پژوهش‌های مرتبط با قلعه تاریخی مورچه‌خورت پرداخته می‌شود؛ نخستین اسناد درباره بقایا و شواهد معماری در دشت مورچه‌خورت گزارش سیاحانی از جمله ماکسیم سیرو(Maxime Siroux)، شاردن(Jean Chardin)، تاورنیه(Jean-Baptiste Tavernier)، به وجود قلعه و کاروانسراهای موجود ، ژان اوتر(Jonas Otter)، رنه د.آلمانی(Henr Rene D'Allemagne)، سدیدالسلطنه، جیمز موریه(James Justinian)، در مورد وجه تسمیه روستا، بروکشو اوژن اوبن(EugèneAubin)و روایت مورخان و جغرافیانویسانی مانند ابن رسته، حمدالله مستوفی، ابوالحسن قزوینی مروی، استرآبادی، گلستانه، ارباب اصفهانی، رستم الحکما که به توصیف در مورد قلعه مورچه‌خورت و شرح مختصری از بافت اطراف پرداخته‌اند، احمدی (۱۳۸۸)، ساختارهای معماری قلعه مورچه‌خورت را با رویکرد تحلیل فضایی مطالعه کرده است، منوچهری (۱۳۸۷) به توصیف این قلعه و مهمترین بناهای درون آن پرداخته است، حاجلو(۱۳۹۱) دشت مورچه خورت را با سه رویکرد باستان‌شناسی محیطی، بافتی و فضایی مورد مطالعه قرار داده و عوامل تأثیرگذار بر روند شکل‌گیری و گسترش و ترک سکونتگاه‌های دشت مورچه‌خورت را بررسی نموده است، امیرحاجلو و نیستانی (۱۳۹۳) ضمن مطالعهٔ شواهد معماری دوران سلجوقی در دشت برخوار، به قلعه تاریخی مورچه‌خورت نیز پرداخته‌اند. حاجلو و سقایی(۱۴۰۰) مؤلفه‌های پدافند غیرعامل در سازمان فضایی و کالبد قلعه تاریخی مورچه‌خورت را مورد سنجش قرار داده اند. لیکن بیشتر مطالعات صورت‌گرفته در قلعه تاریخی مورچه‌خورت بیان توصیف کالبدی و روابط فضایی و روند شکل‌گیری این مجموعه است و به‌صورت مجزا مطالعه بر روی مصالح این ساختار خشتی صورت نرفته است از طرفی عمده مشکل دررابطه‌با این ساختارهای گلین فروریختگی و فرسایش‌پذیری حاصل از رطوبت است و این قلعه تاریخی مورچه‌خورت طی چند سال به دلیل عدم امنیت در برابر بارندگی‌های شدید ناگهانی مهاجرت رخ می‌دهد و عمده آسیب‌های وارد شده در حال حاضر عوامل طبیعی از جمله بارندگی است. پیشینه پژوهش‌های صورت‌گرفته در مورد قلعه مورچه‌خورت می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ پژوهش حاضر درصدد بررسی تکنیک‌های نوین برای تولید مصالح جدید و خشتی نوین مقاوم در برابر رطوبت است که بتواند بر عمر این گنجینه‌های ارزشمند تاریخی قلعه مورچه‌خورت بیفزاید و هزینه‌های اقتصادی حاصل از مرمت‌های پیاپی را به‌مرورزمان کاهش دهد.

۳. مبانی نظری پژوهش

روش‌های زیادی برای مقاوم سازه‌های گلین در ایران و جهان به‌صورت سنتی و مدرن مورداستفاده قرار گرفته است که با افزودن مواد مقاوم در بهینه‌سازی مصالح و مواد تشکیل‌دهنده خاک می‌توان گام برداشت (Houben, 1994:7). این مواد افزودنی در مصالح گلین، جهت دوام و استحکام به کار می‌رود، مهم‌ترین مزایای استفاده از این مواد ثبات و طول عمر بیشتر آنها در مقایسه با مواد طبیعی و امکان کنترل ترکیب آنها و عدم تغییر رنگ و بافت زودرس می‌گردد (Avrami et al: 2008: 100). ازاین‌رو انواع افزودنی‌ها در جهت تثبیت خاک در دسته‌بندی زیر معرفی می‌گردد (جدول۱).

در این پژوهش در دسته مواد طبیعی آلی با منشاء گیاهی از کاه استفاده شد که در خشت اولیه قلعه نیز مورد استفاده قرار گرفته بود و با توجه به اینکه هدف پژوهش استفاده از مواد اولیه به کارگرفته شده در خشت نوین در قلعه مورچه خورت بود از مواد طبیعی و مصنوعی معدنی صرف نظر شد. در دسته بندی مواد مصنوعی آلی از امولسیونها اکریلیک و امولسیون سینتتیک که محلول هایی دارای قابلیت ترکیب با آب بدون تغییر در موارد اولیه خشت است استفاده شد و از الیاف مصنوعی پروپیلین جهت سنجش سازگاری و جایگزینی با کاه گزینش شد که با استفاده از این ترکیبات دست به تولید خشت نوین زده و سپس به بررسی میزان مقاومت فشاری و نفوذپذیری آن در برابر رطوبت پرداخته شد.

جدول ۱: معرفی افزودنی های قابل استفاده برای خشت

Table 1. Introduction to additives that can be used for clay

Type of Additive		Primary Materials Used	Properties/Functions
Natural Organic Materials	Plant Origin	Wheat, barley, and rice straw, alfalfa, reeds, chopped bamboo, coconut fibers, pine needles (Warren, 2008: 102; Minke, 2009: 64). Corn stalks, corn cobs, cotton stalks, rice husks, banana stems, palm fibers, coconut leaves, and wood chips (Pinto et al, 2012). Alfalfa, sisal, elephant grass (Bahobail, 2012: 27).	Binding soil particles, increasing tensile strength, leveling soil and earthen materials, optimizing soil moisture regulation, 'leaning' (making less plastic) clay soils and reducing shrinkage, lightening the soil, acting as a thermal insulator (Ebrahimi, 2019: 295; Esmaeili & Qaleh Novi, 2012: 55), reducing cracking, providing moisture resistance.
	Animal Origin	Animal dung, cow manure, feces of horses and donkeys, amino acid proteins (blood, animal glues such as size/hide glue, gelatin, and casein), mammalian hides, bones, and tendons, collagen, gelatin, casein, termite saliva, termite saliva and feces (Pereira et al, 2008: 248).	Increasing soil hardness and strength, soil modification, compacting soil particles, increasing soil cation exchange capacity (CEC), increasing the amount of organic matter and nutrients in the soil.
Natural Mineral Materials		Sand, wind-blown sand (dune sand), silica, clay, natural pozzolans, powdered coral shell.	Stabilizing clay soil, achieving uniform gradation, appropriate distribution, creating better cohesion between particles, balancing soil shrinkage to prevent cracking (Bahobail, 2012: 24).
Synthetic Organic Materials		Liquid and semi-liquid synthetic organic materials such as various synthetic resins, paraffins, waxes, and latexes. Polymers, emulsions, synthetic vegetable fibers including polypropylene fibers. Cellulose, amino, and acrylic resins.	For soil stabilization, UV resistance, creating adhesion/binding properties, solvent resistance, for strengthening and moisture-proofing, transparency, and damp-proofing walls and historic structures (Bahadori, 2007: 160).
Synthetic Mineral Materials		Gypsum, ash, Portland cement, lime, powdered brick (brick dust).	Improving physical and mechanical properties of building materials, improving and increasing compressive strength.

٤. قلعه تاریخی مورچه خورت

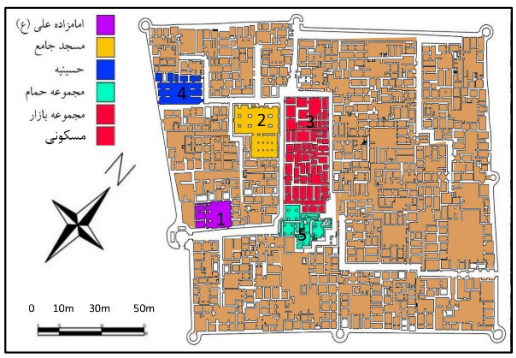
روستای مورچه‌خورت دارای قلعه‌ای کهن و وسیع با ساختار معماری پیچیده، چندطبقه‌ای دارای بارویی محکم و بلند و چهار برج مدور در گوشه‌ها و چهار نیم‌دایره در وسط اضلاع دارد که تا چند دهه پیش، محل سکونت تمامی اهالی روستا بوده است (حاجلو، ۱۴۰۰: ۲۲۳). این قلعه با چند در ورودی و حصار خشتی رفیعی که به مرورایام از ارتفاع آن کاسته شده است، نگهداری می‌شود. گذرها و ساباطها با عبور از میان خانه‌ها و فضاهای عمومی از جمله مسجد جامع، مجموعه حمام، امامزاده علی (ع)، حسینیه، راسته‌بازار و نمازخانه ترکیب منحصربه‌فردی از فضاهای ناب معماری را به وجود آورده است. تاریخ مستندی از زمان ساخت قلعه مورچه‌خورت در دست نیست، اما با گذری در فضاهای آن می‌توان نمونه‌هایی از معماری دوران ایلخانی، صفویه و قاجار را که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند ملاحظه نمود (شکل ۱ و۲).

سازه اصلی قلعه مورچه خورت از خشت است که در دیوارهای قطور خارجی، دیوارهای داخلی و سقف جهت طاق زنی و راه پله ها مورد استفاده قرار گرفته است که این متریال همساز با اقلیم منطقه است، علاوه برآن در اجرای پی خانه ها از سنگ لاشه به دلیل مقاومت در برابر فرسایش و از چوب نیز برای نعل‌درگاه‌ها و شیر سرها، درب و پنجره استفاده شده است، در جدول ۲ به معرفی مصالح در مجموعه قلعه مورچه خورت پرداخته شده است.



شکل۱: تصویر هوایی از قلعه تاریخی مورچه خورت اصفهان

Figure 1. Aerial view of the historical Morchekhort Castle in Isfahan



شکل۲: پلان کلی مجموعه و معرفی کاربری های موجود

Figure 2. General plan of the complex and introduction of existing uses

جدول ۲: بررسی مصالح در ابنیه های قلعه تاریخی مورچه خورت

Table 2. Study of materials in the buildings of the historical castle of Morchekhort

	Historical Structure	Structural Element
Historical Houses of Morchekhort Castle	Main structure and roof, interior and exterior walls, *kolombo* vaults, arches (*tuizeh* arches)	Adobe Brick (*Khesht*)
	Building foundations, wells, borders around gardens/courtyards	Stone
	Doors and windows of historical buildings, ceiling, landings, and thresholds	Wood
	Staircases	Baked Brick (*Ājor*)
	Interior coatings/plaster	Gypsum (*Gach*)
	Interior coatings/plaster	Clay and Gypsum (*Gach-o-Khak*)
	Interior and exterior coatings/plaster	Straw-Clay Render (*Kāhgel*)
	Clay mortar (for laying bricks in interior/exterior walls and flat/curved roofs)	Mortar (*Melāt*)
Historical Bathhouse of Morchekhort Castle	Preparation of lime-clay mortar and straw-clay render	Clay (*Khak-e-Ras*)
	All piers (*jerz-hā*), arches (*tuizeh* arches)	Baked Brick (*Ājor*)
	Exterior walls, paving/flooring, basin (*hōz*), vestibule (*kafshkan*), changing room (*sarbineh*), columns, stairs, foundation	Stone
	Entrance door, vestibule (*kafshkan*)	Wood
	Lime-clay, *sārūj* (hydraulic lime mortar), sand-lime, *pīh-āro* (traditional fatty mortar)	Mortars (*Melāt-hā*)
Historical Mosque of Morchekhort Castle	Probable foundation of the structure	Lime-Grout (*Shafteh Āhak*)
	Probable foundation of the structure, columns of the northern prayer hall (*Shabestān*)	Stone
	Flooring, walls, courtyard facade, vaulting of the winter prayer hall	Baked Brick (*Ājor*)
	All piers (*jerz-hā*)	Adobe Brick (*Khesht*)
	Wainscoting of the southwestern and northeastern prayer halls, flooring of the northeastern prayer hall	Tile (*Kāshi*)
	Lime-grout (*Shafteh Āhak*), clay, straw-clay (*Kāhgel*), sime-clay (*Simgol*), gypsum, gypsum and clay (binder for adobes, interior/exterior finishes, roof covering)	Mortars (*Melāt-hā*)

عمده ملات مورد استفاده نیز ملات کاهگل است، برج اصلی لاشه‌سنگ با ملات گل آهک و خشت و چینه در بدنه اصلی به همراه کاهگل که هرچند ردیف از آجر برای یکنواختی و همگنی در بدنه اســتفاده شــده اســت. اندازه خشت‌ها در قلعه مورچه‌خورت متفاوت است خشت‌های ۲۳*۲۳*۶ سانت و ۲۷*۲۷*۷ سانت و قسمت‌هایی نیز با درصد فراوانی ۲۵*۲۵*۵ سانت یافت شد.

یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر مصـالح گلین آبشـستگی ناشـی از نیروهای مکانیکی باران، پودر شـدن و پوسـته‌شـدن (نشـات گرفته از پدیده مکث رطوبتی) و ماندن رطوبت در سـاختمان برای طولانی‌مدت اسـت که ترک‌خوردن (ناشــی از تکرار متفاوت چرخه خشــک و تر ماندن مصــالح اسـت)، ازهم‌پاشـیدگی (ناشـی از شـکل تخلخل در سـاختمان خشـت و مکش موییـنگی اسـت)، شـوره زنی (ناشـی از وجود نمک محلول موجود در خشـت) و تماس مصـــالح با رطوبت اســـت(ابراهیمی، ۱۳۹۸: ۱۷۵)، در قلعه تاریخی مورچه خورت خشـت‌ها به‌خاطر سـاختمان فیزیکی ضـعیف و عدم پیوسـتگی بین اجزای تشـکیل‌دهنده آن از اسـتحکام و مقاومت کافی برای جهت تحمل تنش در برابر عوامل رطوبتی را نداشـــته اند و با تأثیرگرفتن از دمای محیط، جذب و دفع رطوبت به صـورت متوالی از درون پاشـیده و دچار ترک می‌شـوند و کم‌کم بافت فرسـایشـی را رقم می‌زنند که در نظر گرفتن خشـت مقاوم در برابر رطوبت منجر به کاهش این آسیب ها خواهد شد (شکل۴).



شکل۳: برآورد فراوانی خشت در قلعه تاریخی مورچه‌خورت

Figure 3. Estimated abundance of brick in the historical castle of Morchekhort



شکل٤: ایجاد شیار فرسودگی در بدنه و جای شیار به‌خاطر تغییر عملکرد ناودان‌ها

Figure 4. Creation of wear grooves in the body and groove location due to changes in the performance of the gutters.

۵. مواد و روش

این پژوهش از نظر هدف یک پژوهش کاربردی اســت که هدف آن سنجش تکنیک‌های نوین در جهت مقاوم‌سازی ساختارهای خشتی است و از لحاظ ماهیت ترکیبی (کمی، کیفی) اســت این تحقیق از نظرراهبرد پیمایشــی (کیفی) اســت و باهدف توصــیف و اکتشــاف آسـیب‌های موجود به‌صورت میدانی گام در بهبود کیفیت مصالح این مجموعه گلین برمی‌دارد و از دانش پیشــینیان برای ســاخت خشــت اســتفاده می‌کند، باتوجه‌به اینکه سنجش شیوه‌های ساخت خشت جدید از طریق مطالعات آزمایشی است به صورت کمی صورت می‌گیرد و راهبرد تجربی را به همراه دارد و به پیگیری بین رابطه علت و معلول (فناوری نوین درمقاوم سازی) و سنجش خشت در این مجموعه که در حیطه پژوهش‌های کمی هست، قدم برداشته و در بخش آزمایشگاهی به ساختارشناسی مواد و مصالح به‌کاررفته در سازه‌های خشتی می‌پردازد و در پایان راهبرد استدلال منطقی نیز در این پژوهش دخیل است چرا که در پایان با سنجش فرضیه پژوهش در مورد مقاوم‌سازی و شیوه‌های به‌کارگیری اصول فناوری در خشت گام برمیدارد.

۵-۱. معرفی آزمایشات مورد استفاده در این پژوهش

این پژوهش با به‌کارگیری تکنیک‌های نوین، زمینه افزایش مقاومت در برابر انواع رطوبت در ســاختارهای گلین را فراهم می‌کند، کلیه آزمایش‌ها صــورت‌گرفته جهت بررســی مقاومت فشــاری و میزان رطوبت نفوذی در خشت‌های تولیدی به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳: مشخصات آزمایش های صورت گرفته در این پژوهش

Table 3. Specifications of the experiments conducted in this study

Type of Test	Standard	Objective	Evaluation Method/Principle		
Soil Particle Size Distribution (Based on Size)	ASTM D 422-87, AASHTO 88-8	To identify granular materials and determine the volume ratio of sand to total soil volume, establishing the distribution of particle sizes.	Coarse Grained	Gravel (Coarsest)	Particle size d > 4.75 mm
			Fine Grained	Sand (Finer)	Particle size 0.075 < d < 4.75 mm
				Silt (Larger)	Particle size 0.002 < d < 0.075 mm
				Clay (Smallest)	Particle size d < 0.002 mm (2 microns)
Hydrometer Test (Based on Moisture/Behavior)	AASHTO T87-86, T88-90 - ASTM D421-58, D 422-63		Granular (Non-Cohesive)	Gravel	These particles lack significant cohesion under moisture. Silt particles are fine but do not exhibit cohesive behavior.
				Sand	
				Silt	
			Cohesive	Clay	Not every particle of clay size is cohesive; cohesion in clay is due to the presence of clay minerals with high water absorption capacity.
X-Ray Diffraction (XRD) Analysis	BS EN 13925	To identify the compounds and phases present in the materials.	XRD analysis involves bombarding the material with short-wavelength X-rays (in the range of atomic spacing). The resulting diffraction patterns are used to study the material's atomic structure and crystalline phases.		
Atterberg Limits Test	AASHTO 84,90-81 - ASTM D 4318-87	To determine specific moisture content thresholds for clay soils.	Liquid Limit (LL)	The moisture content at which the soil-water mixture transitions into a liquid state and begins to flow with a slight increase in water.	
	AASHTO T89,90-81 - ASTM D 89,90-		Plastic Limit (PL)	The minimum moisture content at which the soil exhibits plasticity and moldable behavior.	
	ASTM D4318		Liquidity Index (LI)	The moisture content at which the soil's shear strength is sufficiently reduced for it to enter a flow state.	

Type of Test	Standard	Objective	Evaluation Method/Principle
Artificial Rain Test	ASTM D7101	To evaluate the durability of the manufactured adobes against rainfall.	Utilizes a non-pressurized rain simulator to generate droplets, followed by drying, weighing, and measuring the degree of erosion and weight loss of the sample.
Compressive Strength Test	ASTM C109	To determine the resistance to compressive force after a specified curing period.	Involves mounting the sample between the machine's platens and measuring the maximum force the sample can withstand before failure.
Immersion Test	ASTM C67	To evaluate the durability of the adobe against environmental factors (water saturation).	Samples are submerged in water for varying time intervals to assess the rate of water absorption and the effect of water on the adobe's durability.
Water Permeability Test (Depth of Penetration)	DIN1048, EN-123901/8	To measure the depth of water penetration into the material based on time and pressure.	Water penetration depth is determined using a colored solution. The depth reached by the dye in the material is made visible after the sample is split using a Brazilian test method (indirect tensile test).

۵-۲. افزودنی های مورد استفاده در این پژوهش

امولسیون سینتتیک ضدآب مخلوطی از دو یا چند نوع مایع غیر قابل امتزاج است این ترکیبات معمولاً از اجزای مایعات به شکل طبیعی یا بیشتر اوقات با استفاده از مکانیسم‌هایی مانند هم زدن تولید می‌شوند، برخی از ویژگی‌های امولسیون سینتتیک (جدول۴) این است که به‌راحتی مورد مصرف قرار می‌گیرد، ازدیاد مقاومت استحکام سطوح، جلوگیری از نفوذ آب، ایجاد مقاومت در برابر سائیدگی، ایجاد حالت روانی در مصالح، آسان‌کردن حالت کاربری، بهبود کارایی، مقاومت در برابر تغییرات دما، مناسب جهت استفاده در فضای داخل و خارج است، موارد مصرف این محلول تهیه ملات برای بند کشی بتن و آجر، جهت تعمیر و پرکردن درزهای مواجه با آب، و به طور کلی هرجا نیاز به چسبندگی بیشتر ملات باشد.

جدول ٤: مشخصات فنی امولسیون سینتتیک

Table 4. Technical specifications of synthetic emulsion

Appearance	Color	pH	Ambient Temperature for Use	Shelf Life
Liquid	White	5	Above 5°C	2 years (if protected from freezing)

افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به ملات جهت جلوگیری از ترک‌خوردگی و جمع‌شدگی ایده جدیدی نیست و شواهدی از کاربرد کاه و موی اسب و در هزاران سال قبل در گل و ساروج وجود دارد. اصولاً تمامی مخلوطهای گچی و سیمانی به طور طبیعی تمایل به جمع‌شدگی دارند؛ ازاین‌رو به‌کارگیری الیاف مذکور در مخلوطهای یاد شده تأثیر قابل‌توجهی در جلوگیری از وقوع چنین پدیده‌ای دارد (جدول ۵).

جدول۵: مشخصات الیاف مصنوعی مورداستفاده (پلی‌پروپیلن)

Table 5. Specifications of synthetic fibers used (polypropylene)

Chemical Structure	Fiber Type	Color	Cross-Sectional Shape	Length	Specific Gravity	Standard Compliance	Dosage	Storage Conditions
100% Polypropylene	Monofilament	White	Circular	12 mm	0.91 g/cm^3	ASTM-C1116	600 g to 3 kg per cubic meter (depending on application)	Unlimited

رزین آکریلیک شفاف پایه آب دارای بیشترین میزان تولید و مصرف در میان رزین‌های پایه آبی است. فرایند تولید آن‌ها به‌صورت امولسیون با استفاده از فرایند پلیمریزاسیون در محیط آبی همراه با یک آغازگر می‌باشد و عمدتاً از آکریلات و متاکریلات بعنوان مونومر در سنتز این نوع از رزین‌های پایه آب استفاده می‌شود. به عنوان ماده پایه برای تولید انواع پوشش های عایق سفید بام، عایق بتن، عایق رطوبتی پشت‌بام، ملات‌های ساختمانی، چسب کاشی، پوشش‌های انعطاف‌پذیر و آب‌بند و بر روی انواع سطوح گچی، سیمانی، بتنی و دیگر بسترها در محیط داخل و خارج ساختمان مورد استفاده قرار گیرد، مشخصات رزین امولسیون مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۶ مشخص شده است.

جدول ٦: مشخصات فنی رزین امولسیون آکریلیک شفاف پایه آب

Table 6. Technical specifications of water-based transparent acrylic emulsion resin

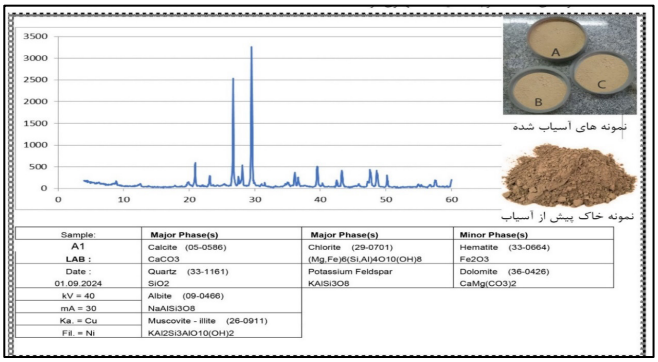
Parameter	Value (Translated from Persian)	Value (From English Specification List)
Appearance	Liquid	Milky White emulsion
Color	White	—
pH	—	6-7
Ambient Temperature for Use	Above 5°C	—
Shelf Life	2 years (if protected from freezing)	—
Solid Content	—	50 ±1%
Viscosity @ 25°C	—	20,000-40,000 cP (Brookfield)
Minimum Film-Forming Temperature (MFFT)	—	15°C
Density @ 23°C	—	1.04 g/cm³
Calculated Glass Transition Temperature (Tg)	—	25°C
Average Particle Size	—	0.1 µm

٦. یافته ها

در ابتدا با بررسی نمونه خاک مورچه‌خورت که خشت‌ها از آن تولید شده‌اند و نمونه خشت‌های مورداستفاده در قلعه مورچه‌خورت به بررسی مواد تشکیل‌دهنده آن با استفاده از آزمایش‌های XRD و آزمایش دانه‌بندی خاک و خشت اولیه پرداخته شد. ۳ خشت از هر سایز از ۹ نقطه قلعه باتوجه‌به فراوانی ابعاد خشت شناسایی شده گزینش صورت پذیرفت، در ابتدا برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی خشت‌ها آسیاب و سپس مخلوط شدند تا مقدمات قرارگیری در دستگاه XRD فراهم گردد.

٦-١- آزمایش XRD[11]

در جهت اینکه خاک مورچه‌خورت برای تهیه این سازه گلین مورداستفاده قرار گرفته است، بر روی خاک و خشت‌های قلعه آزمایش XRD صورت پذیرفت، این آزمایش در شرایط محیطی آزمایشگاهی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۶ درصد در تاریخ ۲۰۲۴/۰۹/۰۱ انجام شد. حدود ۱۰۰میلی گرم (حداقل ۳ گرم نمونه به‌صورت پودر با سایز ۷۵ میکرون (زیر سرند ۲۰۰ مش)، نمونه باید همگن و معرف باشد) نمونه‌های آسیاب شده در قطعه‌ای به ابعاد ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ میلی‌متر قرار گرفت.



شکل ۵: نتایج حاصل از آزمایش XRD برروی خاک قلعه مورچه خورت(آزمایشگاه شهرک فناوری دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۴۰۳)

Figure 5. Results of XRD test on soil from the castle Morchekhort (Technology City Laboratory, Isfahan University of Technology, 2024)

نتایج حاصل از این آزمایش نشان می‌دهد فازهای اصلی تشکیل‌دهنده خاک و خشت؛ کلسیت (کلسیم کربنات)، کوارتز (سیلیسیم دی‌اکسید، سیلیکا، سیلیس)، آلبیت(فلدسپات $NaAlSi_3O_8$)، مسکوویت(ماده معدنی سیلیکات غنی از پتاسیم و آلومینیوم) تشکیل شده است و فازهای فرعی(جزئی)، فلدسپات پتاسیم و کلریت$(Mg,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ است. با انجام آزمایش دانه‌بندی بر روی خاک و خشت‌های قلعه مورچه‌خورت مشخص گردید، خاکی که خشت‌های قلعه از آن تهیه شده است دارای ۴۳ درصد لای و رس، ۴۷ درصد ماسه، و حدود ۱۰ درصد شن و بدون قلوه‌سنگ است و با سنجش دانه بندی کلوخه (خشت)های مورچه‌خورت حدود ۴۶ درصد لای و رس، ۴۵ درصد ماسه و ۹ درصد شن و بدون قلوه‌سنگ است(خشت ها با توجه به فراوانی سایز از سه نمونه انتخاب و راهی آزمایشگاه برای دانه بندی شد).

٦-٢. آزمایش حدود اتربرگ[12]

در آزمایش حدود اتربرگ، حد مایع یا حد روانی LL (Liquid limit)، حد خمیری PL (Plastic Limit)، شاخص روانی LI (Liquidity Index)، در قلعه مورچه خورت مورد بررسی قرار گرفت.این آزمایش سه بار به صورت متوالی صورت پذیرفته است و نتایج ارائه شده در جدول۷ جمع نتایج سه آزمایش است (شکل۶و۷).



شکل۶: تعیین حد روانی نمونه‌ها(آزمایشگاه خاک و مکانیک استان اصفهان، ۱۴۰۳)

Figure 6. Determination of the flow limit of samples (Soil and Mechanics Laboratory of Isfahan Province, 2024)



شکل ۷: تعیین حد خمیری نمونه‌ها(آزمایشگاه خاک و مکانیک استان اصفهان، 1403)

Figure 7. Determination of the paste limit of samples (Soil and Mechanics Laboratory of Isfahan Province, 2024)

جدول ۷: تشریح حدود اتربرگ خاک و خشت قلعه مورچه خورت(آزمایش خاک و مکانیک استان اصفهان)

Table 7. Description of the Atterberg limits of soil and clay of Morchekhort castle (Soil and Mechanics Test of Isfahan Province)

Laboratory Sample No.	Borehole/Sample Description	LL (%)	PL (%)	PI (%)
207701	Bagged Soil	23	15	8
207707	Clod Sample	23	15	7

با بررسی شاخص حد خمیری و حد روانی و شاخص روانی در کلوخه و خاک مشخص گردید درصد موارد افزودنی برای تهیه خشت تأثیری در جذب آب و حالت خمیری خشت نداشته و خاصیت رسی خود را حفظ کرده است و با بررسی حد خمیری مقاومت درصد اجزای تشکیل‌دهنده رس برای خاک و تولید خشت به مقاومت کم و حلت کمی خمیری شناسایی شد. با مشخص‌شدن ویژگی‌های خاک اقدام به تهیه خشت‌های جدید با استفاده از افزودنی‌های مطرح شده گردید. تمامی مراحل کار به شیوه سنتی به ترتیب از جمله آخوره کردن کاه و گل، سرند کردن خاک، لگدمال‌کردن گل و خاک جهت باز شدن دانه ها، افزودن محلول و الیاف، ترکیب الیاف با خشت پایه، ضربه‌زنی برای تخلیه هوا و متراکم‌کردن خشت و درنهایت قالب‌زنی ملات برای تهیه خشت، آماده‌کردن بستر مسطح پوشیده با کاه انجام شد (شکل۸و۹).



شکل۸: خشت ها طبق کدهای تهیه شده

Figure 8. Bricks according to the prepared codes



شکل۹: کد گذاری خشت طبق افزودنی ها

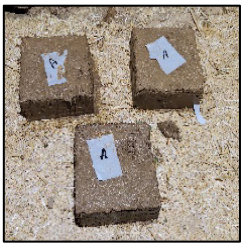
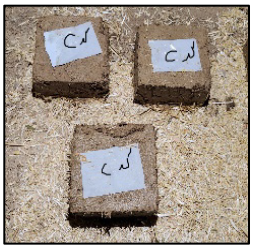
Figure 9. Coding of clay according to additives

جهت تهیه خشت به میزان مساوی خاک و کاه با یکدیگر ترکیب گردید سپس برای تولید کدها با ترکیبات افزودنی‌ها شامل الیاف طبیعی (کاه) و الیاف مصنوعی (پروپیلن، تکنیک نوین)، محلول‌های محلول امولسیون سینتتیک و محلول رزین امولسیون اکریلیک(مواد مصنوعی آلی) ۸ مدل خشت و با خشت اولیه ۹ مدل خشت تهیه گردید و در نهایت نمونه خشت‌های تولیدی بر طبق کدگذاری‌های انجام شده صورت پذیرفت و میزان و مشخصات مواد افزودنی در جدول ۸ مشخص گردیده است.

با توجه به تولید ۸ کد از خشت های ساخته شده در جهت رسیدن به خشت بهینه و مقاوم در برابر رطوبت به سنجش این کدها با خشت اولیه(کدo) پرداخته می شود بنابراین با مشخص کردن فرضیات جهت سنجش آزمایشگاهی گامی جهت پاسخ به سوال پژوهش و رسیدن به هدف اصلی برداشته می شود.

جدول ۸: معرفی نمونه های تولیدی برای خشت با استفاده از تکنیک نوین

Table 8: Introduction of production samples for brick using modern techniques

Code Name	**A**	**B**	**C**	**D**
Constituent Materials	Soil + Synthetic Fiber (Polypropylene)	Soil + Straw (Base Adobe) + Synthetic Fiber (Polypropylene)	Soil + Acrylic Emulsion Resin Solution	Soil + Straw (Base Adobe) + Synthetic Emulsion Solution
Image of Prepared Brick				
Quantity Used	½ Soil + 50 g Fiber	½ Soil + ½ Straw + 50 g Fiber	½ Soil + 20 g Solution	½ Soil + ½ Straw + 20 g Solution
Code Name	**E**	**F**	**I**	H
Constituent Materials	Soil + Synthetic Emulsion Solution	Soil + Straw (Base Adobe) + Acrylic Emulsion Resin Solution	Soil + Straw (Base Adobe) + Synthetic Fiber (Polypropylene) + Acrylic Emulsion Resin Solution	Soil + Straw (Base Adobe) + Synthetic Fiber (Polypropylene) + Synthetic Emulsion Solution
Image of Prepared Brick				
Quantity Used	½ Soil + 20 g Solution	½ Soil + ½ Straw + 20 g Solution	½ Soil + ½ Straw + 20 g Fiber + 50 g Solution	½ Soil + ½ Straw + 20 g Fiber + 50 g Solution

Note on Quantity Used: The quantities listed above were used to produce three bricks with dimensions of 10 × 10 × 5 cm for this research.

٦-٣. آزمایش باران مصنوعی برای آبشویی مصالح

باتوجه‌به مسئله پژوهش که فرسایش‌پذیری در برابر عوامل محیطی از جمله رطوبت از معضلات اصلی مصالح خشتی در مجموعه قلعه مورچه‌خورت است چرا که هر ساله تحت نزولات جوی قسمت اعظمی از این ساختار تخریب می‌شود، بنابراین با انجام آزمایش باران مصنوعی نمونه خشت‌های تولیدی در برابر رطوبت مقاوم سنجی شد، این آزمایش با کد استاندارد ASTM D7101 جهت ارزیابی دوام خشت‌های تولیدی در برابر بارندگی است از هر کد سه نمونه آزمایشگاهی با قالبی به شکل مکعب به ابعاد ۱۰*۱۰*۵ سانتی‌متر تهیه شد پس از خشت شدن خشت در بازه زمانی ۳ روزه مورد مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفت، در این آزمایش از یک دستگاه شبیه‌ساز باران صحرایی از نوع مولد قطره بدون فشار، طراحی شده بر اساس مدل معروف هلندی دانشگاه ویگنگن استفاده شده است، میانگین ارتفاع باران حدوداً ۶۰ سانتی‌متر با قطر قطراتی حدود ۲ تا ۳ میلی‌متر، شدت بارندگی ۱۲۰میلیمتر در ساعت و مساحت پلات دستگاه ۰.۲۵ متر بود.

در ابتدا نمونه‌ها قبل از آزمایش باران با ترازوی دیجیتالی به‌دقت ۱۰۰ میلی‌گرم توزین و ابعاد آن به طور دقیق با استفاده از کولیس (Vernier

Caliper) بادقت ۰.۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد، خشت تولید شده به‌منظور خشک‌شدن رطوبت سه روز در فضای محیط قلعه قرار گرفت و سپس جهت بررسی راهی آزمایشگاه شدند، در آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید و سپس وزن‌کشی صورت پذیرفت، هر گروه سه‌تایی نمونه‌ها به طور میانگین در ۱۰ دقیقه، ۲۰ دقیقه و ۴۰ دقیقه طی زمان‌های دوبرابری بر روی صفحه‌ای شیشه‌ای به ابعاد خشت داخل دستگاه قرار گرفت تا باران متوسط و طبیعی طی دقایق متوالی مدل‌سازی شود. پس از انجام آزمایش نمونه‌های خشت فرسایش‌یافته به‌آرامی از دستگاه خارج و جهت خشک‌شدن سه روز در محیط آزمایشگاه قرار گرفت و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۵ درجه در آون قرار گرفت تا خشک شود و سپس وزن نمونه‌ها و میزان هدررفت خشت نسبت به وزن خشت اولیه تحت فرسایش مصنوعی با دستگاه باران‌ساز محاسبه شد (جدول۹).

در شکل ۱۰ تصاویر کدهای خشتی بعد از آزمایش باران مصنوعی ۴۰ دقیقه ای و قرار گیری در محیط آزمایشگاه پس از خشک شدن مشخص گردید.



شکل ۱۰: نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش آبشویی

Figure 10. Samples after the water washing test

جدول۹: نتایج باران مصنوعی بر روی خشت اولیه و خشت های تولیدی

Table 9. Results of artificial rain on primary and production bricks

Additive Material and Quantity	Final Weight (kg)	Mass Loss (%)	Final Weight (kg)	Mass Loss (%)	Final Weight (kg)	Mass Loss (%)	Initial Weight Before Test (kg)
	After 10 min Rain Test		After 20 min Rain Test		After 40 min Rain Test		
Code A: ½ Soil + 50 g Fiber	1.005	-6.16	0.851	-20.54	0.721	-32.67	1.071
Code B: ½ Soil + ½ Straw + 50 g Fiber	0.791	-13.64	0.625	-31.76	0.527	-43.12	0.916
Code C: ½ Soil + 20 g Solution	1.11	-17.28	0.885	-34.05	0.711	-47.01	1.34
Code D: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Solution	0.908	-1.08	0.896	-2.39	0.887	-3.37	0.918
Code E: ½ Soil + 20 g Solution	1.079	-2.79	0.945	-14.86	0.765	-31.08	1.11
Code F: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Solution	0.801	-18.76	0.752	-23.73	0.601	-39.04	0.986
Code I: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Fiber + 50 g Solution	0.750	-8.08	0.621	-23.89	0.521	-36.15	0.816
Code H: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Fiber + 50 g Solution	0.931	-1.37	-9.19	-2.64	0.908	-3.81	0.944
Code O: Soil + Straw	1.25	-17.92	0.936	-38.54	0.712	-53.25	1.523

Note: All weights are presented in kg. The data represents the average findings from the production of three adobe bricks (10×10×5 cm) for each code.

٦-٤. آزمایش غوطه وری خشت

این آزمایش با کد استانداردASTM C67 جهت تعیین میزان جذب آب و ارزیابی دوام خشت‌های تولیدی و میزان مقاومت آن در برابر رطوبت صورت پذیرفت، جهت ارزیابی میزان دوام خشت به آزمایش باران مصنوعی بسنده نشد و برای سنجش سه نمونه خشت تولیدی در هر کد به شکل مکعب به ابعاد ۱۰*۱۰*۵ سانتی‌متر تهیه شد، خشت‌های تولیدی بعد از خشک‌شدن در بازه زمانی سه‌روزه جهت بررسی آزمایش غوطه‌وری راهی آزمایشگاه شد، در ابتدا نمونه‌ها در آون با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ در آون خشک گردید و سپس وزن‌کشی تمام نمونه‌ها انجام شد این آزمایش در شرایط محیطی آزمایشگاهی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۶ درصد در تاریخ ۲۰۲۴/۰۸/۱۰ صورت پذیرفت، آزمایش بر روی خشت‌های تهیه شده با کدگذاری‌های مشخص انجام شد. دمای آب در دامنه ۲۰-۲۲ درجه سانتی‌گراد و طی ۲۴ ساعت غوطه‌وری صورت گرفت میزان pH آب حدود ۷ (بر طبق استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۷۴۸)و بدون هیچ آلاینده‌ای در نظر گرفته شد.

نمونه‌ها در ظرف‌ها که اطراف آزادی برای حرکت آب داشته باشد قرار گرفت و تا روی خشت پرازآب شد تا طی ساعات متوالی واکنش خشت مشخص گردد. میزان ساعات متلاشی‌شدن خشت در جدول ۱۰ مشخص شده است. نمونه‌ها در ابتدا ۴ ساعت، ۱۲ ساعت و سپس ۲۴ ساعت در آب غوطه شد خشت اولیه با کد O در ۴ ساعت اول، کد A، B و C بعد از حدود ۸ ساعت، کد E، F و I بعد از ۱۲ ساعت متلاشی گردید و قابل وزن‌کشی بعدازاین ساعات نبود، کد F و D بعد از ۲۴ ساعت از آب خارج و جهت خشت شدن و وزن‌کشی آماده گردید. پس از انجام آزمایش خشت غوطه‌ور به‌آرامی آب خارج و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۵ درجه در آون قرار گرفت تا خشک شود و درنهایت وزن نمونه‌ها و میزان هدررفت خشت نسبت به وزن خشت اولیه تحت آزمایش غوطه‌وری محاسبه گردید.

جدول ۱۰: وضعیت نمونه ها بعد از ساعات تعیین شده

Table 10. Status of samples after specified hours

Code	Code D	Code C	Code B	Code A	Code O
Image of Brick					
Disintegration Time (hours)	After approximately 8 hours	After approximately 8 hours	After approximately 8 hours	After approximately 4 hours	Disintegrated after 2 hours
Code		**Code H**	**Code I**	**Code F**	**Code E**
Image of Brick					
Disintegration Time (hours)		After approximately 24 hours	After approximately 12 hours	After approximately 12 hours	After approximately 24 hours

جدول ۱۱: نتایج آزمایش غوطه وری خشت های تولیدی و خشت اولیه

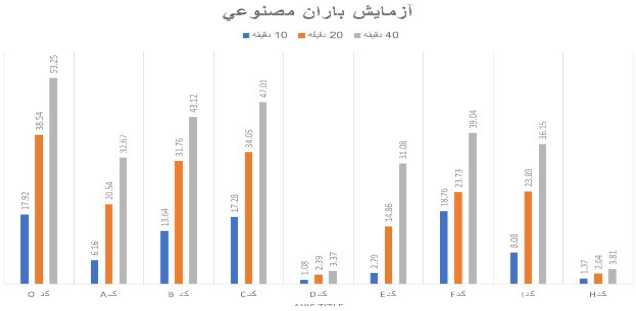
Table 11. Results of immersion test of produced and primary bricks

Additive Material and Quantity	Final Weight (kg)	Mass Loss (%)	Final Weight (kg)	Mass Loss (%)	Final Weight (kg)	Mass Loss (%)	Final Weight (kg)	Mass Loss (%)	Initial Weight Before Test (kg)
	After 4h		After 8h		After 12h		After 24h		
Code A: ½ Soil + 50 g Fiber	0.823	-23.1	Disintegrating		----------				1.071
Code B: ½ Soil + ½ Straw + 50 g Fiber	0.723	-11.3	Disintegrating		----------				0.816
Code C: ½ Soil + 20 g Solution	1.05	-8.05	Disintegrating		----------				1.142
Code D: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Solution	0.806	-1.46	0.79	-2.9	0.78	-4.5	0.77	-5.0	0.818
Code E: ½ Soil + 20 g Solution	1.03	-7.02	0.98	-11.2	Disintegrating		————		1.110
Code F: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Solution	0.801	-1.83	0.76	-6.25	Disintegrating		————		0.816
Code I: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Fiber + 50 g Solution	0.75	-2.71	0.68	-10.8	Disintegrating		————		0.771
Code H: ½ Soil + ½ Straw + 20 g Fiber + 50 g Solution	0.92	-1.9	0.91	-2.86	0.912	-3.3	0.895	-5.2	0.944
Code O: Soil + Straw	Disintegrating		----------						1.523

Note: All weights are presented in kg. The data represents the average findings from the production of three adobe bricks (10×10×5 cm) for each code.

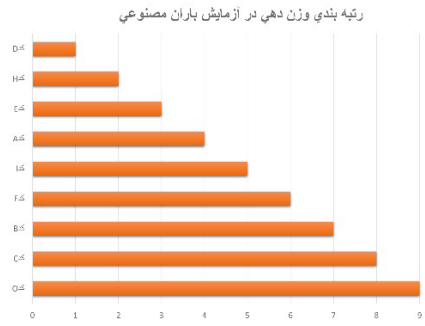
٦-٥. نتایج آزمایش باران مصنوعی و غوطه‌وری از نمونه‌های خشت تولیدی

یکی از مهمترین مشکلات ساختارهای گلین عدم دوام در برابر عوامل محیطی از جمله رطوبت است و یکی از مهم‌ترین معضلاتی که ساختارهای گلین با آن مواجه است پیش‌داوری در مورد ترکیب مصالح جهت حفاظت، مرمت و مقاوم‌سازی بنا در برابر آسیب‌های وارده است، بنابراین این پژوهش با تولید کدهای مختلف با ترکیب مصالح نوین در قدم اول به سنجش دوام و ارزیابی مقاومت در برابر باران و آب که یکی از عوامل فرساینده رطوبتی است پرداخت که مقایسه نتایج حاصل از آزمایش باران مصنوعی و رتبه‌بندی کدها در شکل۱۱و۱۲ و نتایج آزمایش غوطه‌وری و رتبه‌بندی کدها در شکل۱۳و۱۴ قابل تشریح است.



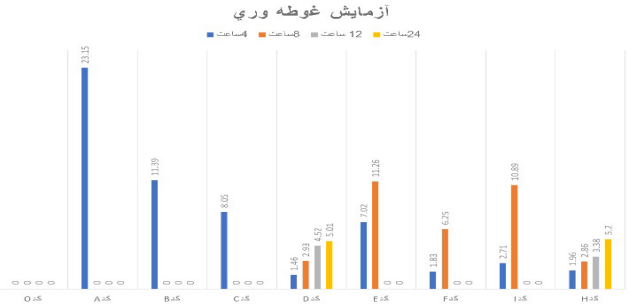
شکل ۱۱: مقایسه کدها در آزمایش باران مصنوعی

Figure 11. Comparison of codes in artificial rain experiment



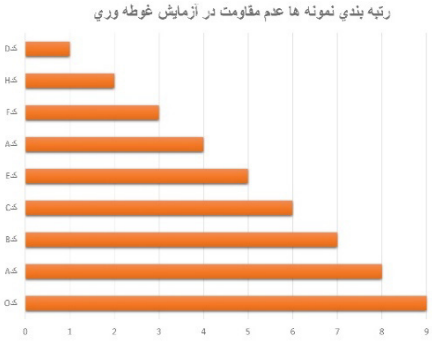
شکل۱۲: رتبه بندی وزن دهی در آزمایش باران مصنوعی

Figure 12. Weighting ranking in artificial rain experiment



شکل۱۳: مقایسه کدها در آزمایش غوطه وری

Figure 13. Comparison of codes in immersion testing



شکل۱٤: رتبه دهی کدها در آزمایش غوطه وری

Figure 14. Ranking of codes in the immersion test

بررسی نتایج حاصل از توزین خشت ها در آزمایش باران مصنوعی بعد از گذشت زمان ۱۰، ۲۰و ۴۰ دقیقه انجام شد این سنجش بعد از خشک شدن نمونه ها در آون توزین صورت پذیرفت، در این میان کد های D ,H وزن کمتری را از میان ۹ کد تعیین شده از دست داده اند که این میزان هدررفت برای کد D حدود ۳.۳۷ در صد و برای کد H حدود ۳.۸۱ درصد را نشان می‌دهد. مقاومت در برابر آزمایش باران این دو کد در برابر سایر کدها بیشتر بوده است. به ترتیب کدها O، C، B، F، i، A، E بیشترین میزان هدررفت وزنی بعد از ۴۰ دقیقه آزمایش باران مصنوعی را دارد که مشخص می‌کند کدهایی که دارای الیاف مصنوعی پروپیلن بودند با فرسایش خشت الیاف نمایان شده و خشت با فشار دست خشت حالت پنبه‌ای به خود گرفته و نرم شده است و نمونه‌ها دارای محلول رزین امولسیون اکریلیک نسبت به محلول امولسیون سینتتیک مقاومت کمتری برخوردارند.

در آزمایش غوطه‌وری نمونه‌ها دارای محلول رزین امولسیون اکریلیک مقاومت کمتری نسبت به محلول رزین سینتتیک برخوردارند و نمونه‌های فاقد الیاف در آزمایش غوطه‌وری دچار ترک بزرگ و دوتکه شدند به ترتیب بیشترین میزان مقاومت در آزمایش غوطه وری مربوط به کد Hو D است و کمترین مقاومت به ترتیب کدO، A، B، C، E، I، Fاست. با در کنار یکدیگر قراردادن کدها در آزمایش باران مصنوعی و آزمایش غوطه‌وری میزان مقامت خشت های تولیدی و اولیه در برابر رطوبت مربوط به کد D و کد H با بالاترین مقاومت را در برابر رطوبت بودند که به مرحله دوم آزمایشگاهی جهت سنجش مقاومت فشاری و آزمایش نفوذپذیری راه یافتند تا نتیجه نهایی برای بهترین نوع خشت تولیدی در برابر رطوبت نسبت به خشت اولیه مشخص گردد.

٦-٦. آزمایش مقاومت فشاری خشت

آزمایش مقاومت فشاری در شرایط استاندارد ASTM C109 جهت دستیابی به مقاومت در برابر نیروی فشاری صورت پذیرفت، در این قسمت کدهای Hو D که در آزمایش غوطه‌وری و باران مصنوعی هدررفت و میزان جذب رطوبت کمتری داشتند موردبررسی و آزمایومش قرار گرفت، خشت‌ها با ابعاد ۵*۵*۵ تولیدی در ابتدا به مدت سه روز در فضای آزاد جهت خشک‌شدن و سپس به مدت ۲۴ ساعت در اون و دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفت، سطوح تمام نمونه‌ها با دستگاه سوهان‌کشی شد(شکل۱۵) تا تنش به‌صورت یکنواخت به نمونه وارد شود. از جک ملات شکن(دستگاه تست مقاومت فشاری) با نرخ بارگذاری یکنواخت حدود ۱ مگاپاسکال برثانیه جهت جلوگیری از شکست یکنواخت خشت استفاده شده است(شکل۱۶) و سپس مقدار حداکثری نیروی وارده بر سطح مقطع خشت به‌عنوان مقاومت فشاری ثبت گردید.



شکل۱۵:نمونه خشت های سوهان کشی شده از کد H,D,O

Figure 15. Sample of polished bricks from code H, D, O



شکل۱۶:جک ملات شکن جهت بررسی مقاومت فشاری نمونه ها

Figure 16. Mortar breaker jack to check the compressive strength of samples

با بررسی مقاومت فشاری کدهای H و D و خشت اولیه (O) با ابعاد ۵*۵*۵ بار وارده در لحظه شکست در نمونهH به میزان ۱۳۲۵ و مقاومت فشاری ۵.۲ مگاپاسکال برآورد شد و در نمونه D بار وارده در لحظه شکست ۱۳۵۲ و مقاومت فشاری ۵.۳ مگاپاسکال برآورد گردید این موارد در نمونه خشت اولیه۰.۲ (Mpa) است؛ بنابراین مقاومت فشاری در نمونه D بالاترین و حدود ۲۵.۵ برابر از نمونه اول برآورد شد و نمونه H بعد از نمونه D حدود ۲۵ برابر از نمونه اول است (جدول۱۲).

جدول۱۲: نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی خشت های تولیدی

Table 12. Results of compressive strength tests on produced bricks

Sample Code	Load at Failure (kgf)	Compressive Strength (MPa)	Moisture Condition
Sample H	1325	5.2	Dry
Sample D	1352	5.3	Dry
Original Adobe	53	0.2	Dry

٦-٧. آزمایش نفوذ پذیری خشت های تولید شده

این آزمایش برای سنجش نفوذ پذیری آب با دستگاه(CO 950) و با استاندارد در استاندارد(DIN1048, EN-123901/8) در نمونه هایی به ابعاد ۱۰*۱۰*۵ سانتی متر در کدDو کدH با هدف عمق نفوذ بر اساس زمان و فشار است. شرایط خشک شدن نمونه ها طبق سایر آزمایشات صورت گرفته در این پژوهش است، نمونه‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شد(شکل۱۷و۱۸و۱۹) که فشار آب برروی سطح مشخص عمل کند و بعد اعمال فشار در سه روز متوالی نمونه‌ها شکسته و میزان نفوذپذیری آب مورد اندازه‌گیری قرار گرفت(شکل ۲۰و۲۱و۲۲)و بدین‌وسیله عمق نفوذپذیری رطوبت مشخص شد این آزمایشات بر روی سه نمونه از هر کد صورت پذیرفت و در این آزمایش عمق نفوذ آب با توجه به محلول رنگی صورت گرفتف به این ترتیب که اثر ماده رنگی در مصالح پس از شکافت نمونه به روش آزمایش برزیلی (کشش غیر مستقیم) با دو نیم شدن نمونه قابل رویت است، اندازه گیری با کولیس فلزی دقیق با دقت ۰.۰۳ میلی متر استفاده شد به منظور کاهش خطای ناشی از ناهمواری سطوح، از سه نقطه مختلف اندازه گیری انجام و میانگین به عنوان مقدار نهایی عمق نفوذ محلول در نظر گرفته شد. نتیجه آزمایش میزان عمق نفوذپذیری در دو کد H و D در جدول۱۳ نشان می دهد، میزان نفوذ آب تحت‌فشار به میزان ۱۸ و ۲۲ به ترتیب برای کد D و H است و نمونه خشت اولیه در این آزمایش طاقت نیاورده و متلاشی گردید.



شکل۱۹:آزمایش نفوذ پذیری خشت اولیه

Figure 19. Primary brick permeability test



شکل۱۸: آزمایش نفوذ پذیری نمونهH

Figure 18. Permeability test of sample H



شکل۱۷: آزمایش نفوذپذیری نمونهD

Figure 17. Permeability test of sample D



شکل۲۲: میزان اندازه گیری کدH

Figure 22. H-code measurement rate



شکل۲۱: میزان اندازه گیری کدD

Figure 21. Code D measurement rate



شکل۲۰: مایع رنگی روی نمونه ها

Figure 20. Colored liquid on samples

جدول ۱۳: آزمایش میزان عمق نفوذ پذیری

Table 13. Penetration depth test

Sample Code	Test Date	Dimensions (cm)	Water Penetration Depth (mm)
Sample D	July 9, 2025	10×10×5	18
Sample H	July 9, 2025	10×10×5	22
Original Adobe	July 9, 2025	10×10×5	Disintegrated

٦-٨. بحث و تحلیل

در این پژوهش در ابتدا با سنجش و مطالعه خاک قلعه تاریخی مورچه‌خورت به‌صورت هدفمند فازهای اصلی و فرعی خاک و خشت قلعه با استفاده از آزمایش XRD به دنبال آن با انجام آزمایش دانه بندی خاک و کلوخه(خشت) درصد لای و رس، درصد ماسه، درصد شن و بدون قلوه‌سنگ است مشخص گردید. با بررسی حدود اتربرگ خاک و با بررسی شاخص روانی حد روانی در کلوخه و خاک درصد موارد افزودنی برای تهیه خشت نشان داد که تأثیری در جذب آب و حالت خمیری خشت نداشته و خاصیت رسی خود را حفظ کرده است و با بررسی حد خمیری مقاومت درصد اجزای تشکیل‌دهنده رس برای خاک و تولید خشت به مقاومت کم شناسایی شد. سپس باتوجه‌به دستورالعمل‌های خشت تولیدی درگذشته و افزودنی‌های معرفی شده در این پژوهش دست به تولید خشت جدید زده شد. آزمایش غوطه‌وری و باران مصنوعی جهت سنجش میزان مقاومت خشت‌های تولیدی از لحاظ شکلی پرداخته شد درآزمایش باران مصنوعی که به مدت های ۱۰، ۲۰، ۴۰ دقیقه و آزمایش غوطه وری که به مدت ۴و۸و۱۲و۲۴ طی چهارمرحله مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت کد Hو کد D بالاترین میزان جهت حفظ شکل ظاهری و درصد فشردگی اجزای تشکیل دهنده را دارا بودند و میزان ماندگاری و متلاشی‌شدن آنها نیز طی ساعات ماقبل و بعد ثبت گردید برای تولید این کدها از ترکیبات خاک + کاه(خشت پایه)+ محلول امولسیون سینتتیک(کدD) و خاک + کاه(خشت پایه)+ الیاف مصنوعی(پلی پروپیلن)+ محلول امولسیون سینتتیک(کد H) استفاده شده است کمترین میزان مقاومت برای آزمایش باران مصنوعی و آزمایش غوطه وری مربوط به خشت اولیه(کدO) است و به ترتیب کد Cبا ترکیب خاک+ محلول رزین امولسیون اکریلیک پس از کدO دارای کمترین مقاومت را دارا می باشد ترکیبات استفاده شده در این کد بدون الیاف، تاثیر الیاف در انسجام و مقاومت رطوبتی در جهت انسجام بیشتر دانه بندی خشت جدید است به دنبال آن پس از کد C، کد B با ترکیب خاک + کاه(خشت پایه)+ الیاف مصنوعی(پلی پروپیلن) است در این ترکیب از محلول استفاده نشده است پس نتیجه آزمایش تاکید بر تاثیر مستقیم محلول ها برمیزان چسبندگی و تثبیت خاک جهت مقاومت در برابر رطوبت است که نتایج آزمایش غوطه وری نیز تاکید بر این مسئله دارد چرا که کد Cبدون الیاف در آزمایش غوطه وری دوتکه ومتلاشی گردید و کد B نیز یکی از کدها با کمترین دوام در برابر آزمایش غوطه وری بود. به دنبال آن با بررسی کدDوH تحت آزمایش مقاومت فشاری و درصد نفوذ پذیری بالاترین مقاومت مربوط به نمونه D با بالاترین بار وارده در لحظه شکست ۱۳۵۲(Kgf) ومقاومت فشاری ۵.۳ مگاپاسکال با ترکیبات خاک + کاه(خشت پایه)+ محلول امولسیون سینتتیک و بود و در سنجش نفوذپذیری رطوبت این دو کد نمونه Dحدودا ۱۸ و نمونه H حدودا۲۲ سانتی‌متر برآورد شد که این اعداد بسیار به هم نزدیک است بنابراین تاثیر محلول امولسیون سنیتتیک در کنار ترکیبات خشت اولیه که شامل کاه و خاک است میتواند بیشترین مقاومت را در برابر رطوبت داشته باشد.

۷. نتیجه گیری

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی خشت های تولیدشده و مقایسه نتایج آزمایشگاهی در یکی از بزرگترین ساختارهای گلین در قلعه مورچه خورت صورت پذیرفت، این کار با استفاده از افزودن مواد طبیعی آلی و مواد مصنوعی آلی در ترکیبات اولیه خشت انجام شد در قدم اول خشت های تولیدی تحت آزمایش غوطه‌وری و باران مصنوعی جهت سنجش میزان مقاومت در برابر رطوبت کد H با ترکیبات خاک + کاه(خشت پایه)+ الیاف مصنوعی(پلی پروپیلن)+ محلول امولسیون سینتتیک و کد D با ترکیبات با ترکیب خاک + کاه (خشت پایه)+ محلول امولسیون سینتتیک بالاترین میزان جهت حفظ شکل ظاهری و درصد فشردگی اجزای تشکیل‌دهنده را دارا بودند، به دنبال آن در نمونه‌های گزینش شده تحت آزمایش مقاومت فشاری و درصد نفوذپذیری، بالاترین مقاومت فشاری و بیشترین درصد مقاومت پذیری در برابر رطوبت مربوط به کد D نسبت به خشت اولیه را است و باتوجه‌به وزن کم این نمونه تولید شده حدوداً ۰.۸۱۸ کیلوگرم در ابعاد ۱۰*۱۰*۵ نسبت به خشت اولیه به این ابعاد با وزن حدود ۱۵۰۰کیلوگرم مقاومت بیشتری داشته باشد. انجام آزمایشات بر روی خشت گزینش شده نشان داد که محلول امولسیون سینتتیک(تکنیک نوین) به مواد اولیه مصالح گلین(تکنیک سنتی) میزان مقاومت بیشتری در برابر رطوبت دارد و الیاف پلی‌پروپیلن (الیاف مصنوعی، تکنیک نوین) استفاده شده در ترکیبات کد Hبه‌جای الیاف گیاهی (کاه، تکنیک سنتی) بر میزان مقاوم‌پذیری مصالح اولیه در برابر رطوبت تأثیرگذار است ولی ممکن است به‌مرورزمان طی سالیان بر اثر عوامل محیطی خشت دچار فرسودگی و آبشستگی شود، رخ الیاف مشخص و نمای غیرقابل‌تحمل و سفیدرنگی به خشت خواهد دهد، در این میان کدهای فاقد الیاف از انسجام کمتری برخوردار بودند و طی آزمایشات سریع متلاشی شدند و نمونه‌ها دارای

محلول رزین امولسیون اکریلیک نسبت به محلول امولسیون سینتتیک مقاومت کمتری برخوردارند. با توجه به تاکید پژوهش بر حفظ ترکیبات اولیه خشت کد D با بالاترین میزان مقاومت شامل ترکیبات خاک + کاه(خشت پایه)+ محلول امولسیون سینتتیک می تواند به عنوان خشت پیشنهادی مقاوم دربرابر رطوبت معرفی گردد. براین‌اساس با کمترین مداخله کالبدی در خشت‌های تولیدی گامی برای افزایش مقاومت فشاری، افزایش مقاومت زلزله پذیری با درصد بالای میزان سبکی نسبت به خشت اولیه و افزایش مقاومت در برابر رطوبت نفوذی صورت گرفت، به‌نحوی‌که اصالت خشت اولیه حفظ شده و از مفهومی عمومی شیوه ساخت آن درگذشته و کسانی که خشت را به‌خوبی می‌شناسند، فاصله نگیرد و به افزایش طول عمر آن در برابر رطوبت که یکی از عوامل آسیب‌رسان جدی به مصالح در این محدوده است کمک شایانی کرده باشد، بنابراین باتوجه‌به مواد افزودنی به خشت در روند فرسایشی ناشی از رطوبت گام‌های ارزشمندی باتوجه‌به آزمایش‌های صورت‌گرفته رهنمون گشت و نتایج حاصل از این پژوهش قابل‌تعمیم به سایر ابنیه با ساختار گلین و ویژگی‌های مشترک در جهت کاربست آن است.

پی نوشت

۱.موسسه کراتر در فرانسه(International Centre on Earthen Architecture) و موزه، مرکز حفاظت فرهنگی گتی(Getty museum) درامریکا و به دنبال آن سایر موسسات در هند، آلمان، کانادا، برزیل، ایتالیا و کره جنوبی در این زمینه ایجاد گردید.

۲. کنگره جهانی معماری خاک اولین و دومین دوره در ایران و در شهر یزد(۱۹۷۲-۱۹۷۶) شروع و به دنبال آن سومین دوره در آنکارا ترکیه(۱۹۸۰)، چهارمین دوره سمپوزیوم و کارگاه های آموزشی حفاظت از خشت در لیما و کوزکو(۱۹۸۰)، پنجمیم دوره همایش متخصصان معماری خشت در رم، ایتالیا(۱۹۸۷)، ششمین دوره حفاظت از معماری خاکی نیومکزیکو آمریکا(۱۹۹۰)، هفتمین دوره لیبسون امریکا(۱۹۹۳)، هشتمین دوره محافظت از معماری خاکی، لندن، انگلیس(۲۰۰۰)، نهمین دوره حفاظت و مرمت خشت در یزد، ایران(۲۰۰۳)، دهمین دوره حفاظت و مرمت خشت در بوماکو، مالی(۲۰۰۸)، یازدهمین همایش بین المللی خشت در لیما، پرو (۲۰۱۲)، دوازدهمین کنگره جهانی معماری خاک در لیون فرانسه (Terra 2016)، سیزدهمین کنگره معماری خاکی در سانتافه، نیو مکزیکو،ایالات متحده امریکا (Terra 2022) و اخرین اجلاس آن قرار است در دانشگاه کوئنکا، اکوادور(۲۰۲۵) برگزار شود.

۳. برخی به زبان فارسی (وارن، ۱۳۸۷)، (مینکه، ۱۳۸۸)، زبان های فرانسوی، آلمانی، انگلیسی و اسپانیایی در خصوص خشت و گل منتشر شده است.

۴. نوعی الیاف گیاهی که از برگ برخی گونه های نخل در امریکای جنوبی به دست می آید.

۵. الیافی بلند و نرم تر از الیاف سیسال است که از گیاه بومی مناطق کوهپایه ای هیمالیا بدست می آید.

۶. الیاف سلولزی حاصل از چوب در مناطق کوهستانی هیمالیا بدست می آید.

۷. (پروتئین ساختمانی متصل کننده بافت ها در حیوانات و ماهی ها)

۸. (تهیه شده از خالص سازی چسب سریشم)

۹. بهترین خاکستر برای مقاومت خاک، خاکستر ذغال سنگ است (Bahobail, 2014: 35-36)

۱۰. پودر آسیاب شده آجر شاموت نامیده می شود.

۱۱. این آزمایش در شرکت نقش پراش صنعتی اصفهان در شهرک فناوری دانشگاه صنعتی اصفهان صورت پذیرفته است که توسط دستگاه High precision XRD با حداقل زاویه گام ۰.۰۰۰۱ درجه و با حداکثر زمان گام۱۲s، انجام شده است.

۱۲. آزمایش در آزمایشگاه خاک و مکانیک اصفهان با دستگاه کاساگراند دستی صورت پذیرفته است.

سپاسگزاری: مقاله حاضر بخشی از مطالعات پژوهشی رساله کارشناسی ارشد نویسنده اول با عنوان«کاربست تکنیک های نوین در مقاوم سازی سازه های گلین در مقابل رطوبت مورد پژوهی: قلعه مورچه خورت اصفهان» است که به راهنمایی نویسنده دوم در دانشکدگان هنرهای زیبای دانشگاه تهران انجام شده است. نگارنده اول برخود واجب میداند از زحمات خانم دکتر سمیه فدایی نژاد بهرامجردی جهت هدایت این پژوهش سپاسگزاری نماید.

مشارکت نویسندگان: این پژوهش در نوشتن متن اصلی، مراحل مختلف آزمایشگاهی، روش پژوهش، مدیریت داده ها، بازخوانی و ویرایش از مشارکت نویسنده اول برخوردار بوده است و نظارت، اعتبار سنجی و مدیریت پروژه را نویسنده دوم انجام داده است.

تأمین مالی: این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تضاد منافع: نویسندگان ضمن رعایت اخلاق نشر در ارجاع دهی، تضاد منافع را اعلام می دارند.

دسترسی به داده ها و مواد: مجموعه داده ها در صورت درخواست از نویسندگان در دسترس است.

References

Amirhajlou, S & Saghaei, S. (1400). Investigation of passive defense components in the spatial and physical organization of the historical Morchekhort Castle of Isfahan, Journal of Hot and Dry Climate Architecture. Issue 9(13). 217-240. [in Persian]

Ahmadi, A. (2009). Space and Society in the Satellite Towns of Isfahan in the Safavid Era: A Case Study of Morchekhort and Qortan, PhD Thesis in Archaeology, supervised by Dr. Hassan Karimian, University of Tehran. [in Persian]

Avrami, Erica, Guillard, Hubert, & Hardy, Mary. (2008). Terra literature review: an overview of earthen architecture conservation, Los Angeles,California.

Avrami, E., Guillaud, H., & Hardy, M. (Eds.). (2008). Terra literature review: An overview of research in earthen architecture conservation. Getty Conservation Institute .

Amirhajlou S & Neistani, J (2014), The distribution, function and pattern governing the structure and decoration of Seljuk works in the Isfahan region. Journal of Cultural History Studies. Iranian History Association, Volume 5, Issue 18, 1-32. [in Persian]

Amirhajloo, S. (2012). Archaeological study of residential centers from the Seljuk to Safavid periods on the northern edge of the Isfahan plain, PhD thesis in archaeology, supervised by Dr. Javad Neistani, Tarbiat Modares University. . [in Persian]

Bater, M, Ahmadi, H., Abedi Kopaei, J (2021). A new method for measuring the permeability and insulating properties of earth materials against moisture and precipitation in ancient sites and historical monuments, Journal of Archaeological Research, No. 7(2), pp. 37-56.[in Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jra.7.2.36

Bater, M., Abedi Kopaei, J., Ahmadi, H., Emadi, R. (2016). Studying the effect of using micronized tectosilicate additives on improving the physical and mechanical properties of traditional thatch coating, Journal of Structural Engineering and Construction, No. 1, pp. 63-80. [in Persian] https://doi.org/10.22065/jsce.2017.43832

Bahadori, R. (2007). Organic Chemistry: Principles and Applications in the Conservation and Restoration of Historical Monuments, Publisher: Research Institute for the Conservation and Restoration of Historical and Cultural Monuments. [in Persian]

Bahramzadeh K& Razeghi A., MiriNajme. (2018). The effect of lime on the optimization of raw brick against humidity, Journal of Housing and Rural Environment, No. 64, pp. 115-124.

Bahobail, M. A, (2012), "The mud additives and their effect on thermal conductivity of adobe bricks", Journal of Engineering Science, Assuit University, 40(1), 21-34. [in Persian] https://doi.org/DOI:%2010.22034/37.164.115

Brkanić Mihić, I& Kraus, I., Kaluđer, J., & Perić Fekete, A. (2024). Architectural features and soil properties of traditional rammed earth houses: Eastern Croatia case study. Buildings, 14(7), 2049. https://doi.org/10.3390/buildings14072049

Calatan, G. (2016). Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks. Construction and Building Materials, 112, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.010

Corrêa AAR, Mendes LM, Barbosa NP, Protásio TP, Campos NA, Tonoli GHD (2015) Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes. Construction and Building Materials 98:250-256. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.009

Ciancio, D., Beckett, C. T. S., & Carraro, J. A. H. (2013). Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. Construction and Building Materials, 40, 210–217. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077

Dormohamadi, M., & Rahimnia, R. (2020). Combined effect of compaction and clay content on the mechanical properties of adobe brick. Case Studies in Construction Materials, 13, e00402. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00402

Dormohamadi, M., Fotuhi Ardakani, M., & Rahimnia, R. (2019). Experimental study of mechanical stabilization impact on improving compressive, tensile and flexural strength of adobe. Journal of Housing and Rural Environment, 38(168), 61–76. [in Persian] https://doi.org/10.22034/38.168.61

Dormohamadi M., Rahimnia R& Fotuhi Ardakani M. (2019). Experimental Study of Mechanical Stabilization impact on Improving Compressive, Tensile and Flexural Strength of Adobe. JHRE. 38(168), 61-76. http://dx.doi.org/2010.22034/38.168.61

Ebrahimi , A (2019), "Enriched clay mortar and new bricks enhanced with indigenous products for conservation measures of Bam Citadel", PhD thesis in Conservation and Restoration of Objects, supervised by Seyyed Mohammad Amin Emami, Behnam Pedram, Isfahan University of Art. [in Persian]

Esmaeili, A& Qaleh Novi, M (2012), "The effect of date palm fibers and lime as natural stabilizers on the mechanical properties of clay in environmental conditions with 35% humidity." Housing and Rural Environment, No. 38, 53-62.[in Persian] http://jhre.ir/article-1-188-fa.html

Gomes, C. D. A. C., Barbosa, N. P.,Gomes, R. D. C., & Barbosa, F. D. S. (2024). Valorization of piassava fiber by its incorporation in adobe bricks. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 96(1). https://doi.org/10.1590/0001-3765202420240210

Gabriela Calatan a ., Andreea Hegyi a., Carmen Dicoa& Calin Mircea(2015), Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials inAdobe Bricks, 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.077

Haji Rasouliha B., Kiani Deh Kiani Gh., Heydari Bani, D& Emami, S (2024), Analysis of the effect of soil properties on the mechanical resistance of historical bricks in Yazd province, Archaeological Research, 10(1), 145-166. [in Persian] https://doi.org/10.61186/jra.10.1.407

Houben, H& Guillaud, H. (1994) Earth Construction—A Comprehensive Guide. Intermediate Technology, London. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3129844

Hosseini Keshtan, S (2022), Application of zeolite in reducing clay erosion of the historical site of Balqis, Archaeological Research, 8(2), 100-81. [in Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jra.8.2.81

Kasie, Y. M., & Mogne, A. Y. (2025). Improvement of mechanical properties of adobe brick reinforced with sisal fiber. Discover Materials, 5(1), 45. https://link.springer.com/article/10.1007/s43939-025-00245-3

Manouchehri M.(2008), Morchekhort Historical Castle, Gateway to the Ancient Capital of Iran, Central Region Housing and Construction Company, Tehran: Samira. [in Persian]

Minke, G (2009); Guide to Construction with Earth: Application of Earth Materials in Modern Architecture, translated by Shahin Tolo Ashtiani, first edition, Tehran: General Public Relations Department of the Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism Organization . [in Persian]

Manaviparast, H. R, Cristelo, N., Pereira, E., & Miranda, T. (2025). A comprehensive review on clay soil stabilization using rice husk ash and lime sludge. Applied Sciences, 15(5), 2376. https://doi.org/10.3390/app15052376

Mohammadi, H., Eslami Hassanabadi, A&MorshEd, R. (1401). Laboratory evaluation of improving the mechanical properties of brick using date fibers, Amir Kabir Civil Engineering Journal, 54(6), 2321-2342[in Persian] https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19652.7222

Namvar Sh. Zarini, M (2019), Investigation of the effect of sodium silicate and acrylic on the compressive, flexural and moisture resistance of thatch mortar, Housing and Rural Environment, 168, 51-60. [in Persian] http://dx.doi.org/DOI:%2010.22034/38.168.51

Ouedraogo, M, Kalifala. D., Millogo,Y., Aubert, j., Messan,A& Seynou,M& Zerbo ,L& Gomina,M(2019) Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (Digitaria exilis) straw, Journal of Building Engineering 23250-258.https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710218306041

Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A, Pereira, Sandra, Tavares, Pedro, Fernandes, Lisete, & Varum, Humberto. (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material. Construction and Building Materials, 34(0), 28-33. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014

Gandia1 M, Andrea A. R. Corrêa2, Francisco C. Gomes2, Diego B. Marin2, Lucas S. Santana(2019) physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with"synthetic termite saliva" Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.39, n.2, p.139-149 http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n2p139-149/2019

Pereira, H. N., Briccoli Bati, S., & Pacheco, F. (2008). Saliva de cupim: Recent experiments with termite mound soil and termite saliva. In Terra 2008 (pp. 373–377). Getty Conservation Institute. https://www.getty.edu/publications/virtuallibrary/9781606060438.html

Rahimnia R& Heydari Bani, D (2011). The effect of the soil paste domain (PI) on the tensile and compressive strength of cement-stabilized bricks for use in the protection of brick structures. Isfahan University of Art. Scientific-Research Publishing House for the Restoration of Historical-Cultural Monuments and Textures, No. 1, pp. 91-102[in Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453850.1390.1.2.1.1

Sharma, V., Marwaha, B. M., & Vinayak, H. K. (2016). Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing. International Journal of Sustainable Built Environment, 5(1), 141–155. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.03.004

Sadeghi, N. H., Oliveira, D. V., Correia, M., Azizi-Bondarabadi, H., & Orduña, A. (2018). Seismic performance of historical vaulted adobe constructions: A numerical case study from Yazd, Iran. International Journal of Architectural Heritage, 12(8), 1183–1196.

Sesay, T., et al. (2025). Bio based stabilization of natural soil for rammed earth: A review. Polymers, 17(9), 1170, https://doi.org/10.3390/polym17091170

Silva a., Oliveira i., Silva v., Mirão j., Faria p. (2020), Vernacular Caramel´s Adobe Masonry Dwellings - Material Characterization. International Journal of Architectural Heritage. https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1751343

Tolles, E. L., Kimbro, E. E., Webster, F. A., & Ginell, W. S. (2008). Seismic stabilization of historic adobe structures: Final report of the Getty Seismic Adobe Project. Getty Conservation Institute .

Warren J. (2008), Conservation of Clay Structures, translated by Mehrdad Vahdati, Chapavel, Tehran: Media Publisher.

Walker, P., & Stace, T. (1997). Properties of some cement stabilized compressed earth blocks and mortars. Materials and Structures, 30(3), 545–551. https://link.springer.com/article/10.1007/BF02486398

zatakram V, Zamanifard A. (2019). Seismic Consolidation of Rural Adobe Building (Case Study: Tabas Isfahak Historical Village). JHRE. 38(166), 123-136[in Persian] http://dx.doi.org/2010.22034/38.166.123

Pahlevan, S. & Fadaei Nezhad Bahramjerdi, S (2025). Application of modern technologies to brick adobe reinforcement in the historical Morchekhort Castle of Isfahan. *Journal of research on Archaeometry, 11*(1), 458. DOI: 10.61882/jra.2025.11.109