

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: sarafadaci@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.

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

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>



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.

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

سمیه پهلوان^۱، سمیه فدایی نژاد بهرامجری^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: sarafadaci@ut.ac.ir

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 مقاومت‌سازی 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 در جهت ارتقای قابلیت کارکردی مصالح از طریق مقاومت‌سازی 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 مقاومت‌سازی 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 با توجه به 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 سینتیک، بالاترین درصد مقاومت در برابر آزمایش مقاومت فشاری و درصد رطوبت‌پذیری نسبت به خشت اولیه را دارد و با توجه به 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 مقاومت‌سازی، 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 با این وجود

همواره با کمبود و یا عدم وجود منابع مفید و قابل استفاده برای حفاظت، مرمت و استحکام‌بخشی بناهای خشتی مواجه بوده است (رحیم‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۰). با این حال 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

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>



حفظ میراث معمارانه خاکی نیاز این دسته از معماری های آسیب پذیر 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 سازه های خشتی، با قدمتی هزاران ساله، بخش مهمی از میراث معماری در مناطق گرم و خشک و نیمه خشک جهان را تشکیل می دهند. در کنار مزایایی چون در دسترس بودن مصالح و هماهنگی با اقلیم، اصلی ترین چالش این سازه ها، آسیب پذیری در برابر رطوبت و بارندگی است؛ چرا که نفوذ آب می تواند باعث کاهش مقاومت فشاری، فرسایش و در نهایت تخریب شود (Pereira et al, 2008). از این رو، تثبیت خاک برای افزایش دوام و کاهش اثرات مخرب رطوبت همواره دغدغه اصلی پژوهشگران بوده است. مشکل اصلی سازه های گلین، عدم دوام در برابر طیف وسیعی از عوامل فرساینده محیطی است و عمده مشکل در رابطه با این ساختارهای گلین فروریختگی و فرسایش پذیری حاصل از رطوبت است که منحصر به یک منطقه نیست و سراسر ابنیه های موجود در جهان به خصوص دارای معماری گلین را مورد تهدید قرار می دهد. بنابراین باید شیوه های نوینی برای حفاظت از این بناهای ارزشمند به کار گرفت که در کنار شیوه های سنتی بتواند در بقا و طولانی کردن این ساختارها متمرکز باشد. این پژوهش با تمرکز بر آسیب های رطوبتی تأثیرگذار جهت فرسایش مصالح خشتی به معرفی راهکار تقویت مصالح با شیوه های نوین از لحاظ مکانیکی و فیزیکی می پردازد و با انجام مطالعات آزمایشگاهی در پی معرفی مصالح خشتی جایگزین در مرمت قلعه تاریخی مورچه خورت برای رسیدن به حفاظت مطلوب جهت مقاوم سازی 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 از طریق مقاوم سازی سازه های گلین قلعه مورچه خورت در برابر رطوبت با استفاده از تکنیک های نوین است قدم برمی دارد و در پی پاسخ به این پرسش است چه تکنیک های نوینی جهت ارتقای قابلیت کارکردی خشت در برای مقاوم سازی ساختارهای گلین در مقابل رطوبت می توان به کار گرفت؟ 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 می رسد اضافه کردن 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 می دهد؛ ۲. به نظر

می رسد الیاف پلی پروپیلن (الیاف مصنوعی، تکنیک نوین) به جای الیاف گیاهی (کاه، تکنیک سنتی) بر میزان مقاوم پذیری 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 می پردازد.

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات علمی زیادی در چند دهه اخیر در سطح بین المللی و داخلی در زمینه بررسی و بهبود خواص مکانیکی خشت، تأثیر افزودنی های معدنی و طبیعی در تثبیت خاک و مقاوم سازی مصالح خشتی صورت پذیرفته است که مهم ترین آنها در موارد زیر دسته بندی می گردد؛ در مورد پژوهش های مرتبط با بهبود خواص مکانیکی و تقویت ساختار سازه های مؤسسه حفاظت گتی تحقیقات گسترده ای در این زمینه انجام داده است. این مطالعات به ویژه بر مقاومت خشت ها در برابر نیروهای زلزله ای و روش های مقاوم سازی مکانیکی بدون آسیب رساندن به ساختار تاریخی تمرکز دارند (Tolles et al, 2008). علاوه بر این، این تحقیقات اهمیت بررسی افزودنی ها و مواد تثبیت کننده مانند آهک، سیمان و لاتکس طبیعی را در بهبود مقاومت مکانیکی خشت ها در برابر رطوبت و افزایش پایداری طولانی مدت آن ها نشان داده اند، که نقش مهمی در حفاظت از میراث خشتی تاریخی ایفا می کند (Avrami et al, 2008). Dormohamadi & Rahimnia (2020) بیان کردند که ترکیب تراکم مکانیکی و محتوای رس می تواند مقاومت فشاری، کششی و خمشی خشت را به طور قابل توجهی افزایش دهد. علاوه بر این، پژوهش های Sadeghi et al (2018) به تحلیل عملکرد لرزه ای طاق های خشتی تاریخی یزد پرداخته شد و بیان کردند که طاق های خشتی در برابر بارهای زلزله آسیب پذیر هستند و نیاز به تقویت دارند و استفاده از افزودنی های طبیعی مانند فیبرهای گندم نیز مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده که این افزودنی ها می توانند مقاومت مکانیکی خشت را بهبود بخشند در محمدی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهش صورت گرفته در اردکان یزد تاکید کردند که تثبیت مکانیکی و اصلاح دانه بندی خاک، رابطه مستقیمی با افزایش مقاومت خشت دارد. مطالعات ذات اکرم & زمانی فرد (۱۳۹۸) بر سیستم های مقاوم سازی لرزه ای و بهبود پایداری ساختمان های خشتی روستایی در ایران تمرکز کردند و کاربرد روش های تقویتی در شرایط واقعی را بررسی نمودند و حاجی رسولی (۱۴۰۳)، به بررسی ساختار تشکیل دهنده خاک و مقاومت مکانیکی

خشت های تاریخی منطقه یزد پرداخته اند، نتایج نشان می دهد، خشت هایی با غالب خاک ریزدانه و مقدار مناسب مواد رسی، مقاومت مکانیکی بهتری در مقابل خشت های با ذرات غالب درشت دانه دارند. به طور کلی، این مطالعات نشان می دهند که استفاده هم زمان از روش های مکانیکی، افزودنی های طبیعی و تکنیک های مقاوم سازی لرزه ای می تواند به طور مؤثر خواص مکانیکی و دوام خشت در ایران را بهبود بخشد.

پژوهشگرانی به بررسی افزودنی ها معدنی مورد استفاده جهت تثبیت و مقاوم سازی خشت پرداخته اند. از این میان Walker & Stace (1997) نشان دادند که استفاده از سیمان به عنوان تثبیت کننده می تواند مقاومت فشاری و دوام خشت را به طور قابل توجهی افزایش دهد. در ادامه، Ciancio et al (2013) با تمرکز بر تعیین مقدار بهینه آهک برای تثبیت خاک در بلوک های فشرده (CSEB) دریافتند که آهک نقش کلیدی در ارتقای دوام بلندمدت و کاهش تغییر شکل های ناشی از رطوبت دارد. بهرام زاده و همکاران (۱۳۹۷) با افزودن ۰.۲ درصد آهک جهت دستیابی به خشتی سازگار با شرایط رطوبتی بالا با درصد ۰.۲ میزان افزودن آهک را پیشنهاد دادند. (Silva 2020) به سنجش میزان رس و ماسه در جهت جذب آب مویری و میزان نرخ خشک شدن خشت پرداخته است که درصد مقاومت مکانیکی و فشاری خشت با افزودن این مواد افزایش می یابد و با خشت های مشابه در مناطق دیگر با درصد آهک موجود مقایسه شده و نتایج نشان می دهد با توجه به خاک هر منطقه میزان افزودنی ها جهت استحکام متفاوت است. باتر (۱۳۹۶) در پژوهش خود بررسی کرد که استفاده از سه درصد وزنی کائولن ۱۵۰ میکرون تا ۶۵ درصد، سه درصد زئولیت ۴۵ میکرون تا ۸۵ درصد ضریب نفوذ پذیری کاهگل را کاهش و خاصیت عایق بندی آن را ارتقا می دهد، نامور و زرینی (۱۳۹۸) به بررسی تأثیر سیلیکات سدیم و اکریلیک بر مقاومت فشاری، خمشی و رطوبتی ملات کاهگل پرداخته اند و نتایج نشان دادند که مقاومت کاه گل حاوی سیلیکات سدیم با نسبت صد درصد حجمی آب به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد که شاخص مقاومت در برابر رطوبت، فشار و خمش کاهگل دارای افزودنی سیلیکات سدیم خیلی بیشتر از کاهگل معمولی است. حسینی کشتان (۱۴۰۱) با آگاهی از کیفیت خشت مطلوب با راهبرد تجربی میزان مطلوب ماده افزودنی زئولیت جهت نفوذ پذیری کم و کاهش فرآیند فرسایش خشت را معرفی کرده است. ابراهیمی (۱۳۹۸) با ارائه نمونه های خشتی ارتقا یافته اذعان داشته که می توان خاصیت ضربه پذیری خشت ها را از حداقل ۱۱.۵ درصد تا حداکثر ۳۴۲ درصد، خاصیت تنش پذیری

خشت ها را از حداقل ۱۰.۱ درصد تا حداکثر ۲۱۴ درصد و خاصیت لغزش پذیری خشت ها را از حداقل ۱۰.۲ درصد تا حداکثر ۳۰۰ درصد بهبود بخشد.

و گروهی دیگر مطالعاتی با استفاده از افزودنی های طبیعی نیز صورت گرفته است. (Gomes et al 2024) با افزودن الیاف piassava به خشت نشان دادند که می توان علاوه بر ارتقای مقاومت مکانیکی، از منظر زیست محیطی نیز به پایداری بیشتر ساخت و ساز دست یافت. به عنوان نمونه، Sharma et al (2016) نشان دادند که افزودن الیاف گیاهی نظیر *Grewia optiva* و *Pinus roxburghii* موجب کاهش ترک خوردگی و افزایش مقاومت خشت در برابر چرخه های مرطوب-خشک می شود. همچنین، Kasie et al (2025) با بررسی تأثیر الیاف سیسال گزارش کردند که افزودن کمتر از ۱٪ فیبر باعث افزایش سه برابری مقاومت فشاری و بیش از سه برابری مقاومت خمشی خشت می شود. Calatan (2016)، با مطالعات تجربی و آزمایشگاهی، تقویت کننده های فیبر طبیعی در آجر خشتی برای استحکام مکانیکی خاک را مورد سنجش قرار داده است، در نتایج نشان می دهد برای مخلوط خاک رس استفاده شده، افزودن بهینه الیاف کف، ۹-۱۰٪ و درصد حجمی ۳۰-۴۰ درصد کاه تعیین شده است Ouedraogo et al (2019) تأثیر نوعی الیاف طبیعی به نام فونیو (Fonio straw) و میزان آن را روی خواص مکانیکی و فیزیکی بلوک های خشتی بررسی کردند. محمدی و همکاران (۱۴۰۱) نشان می دهد افزودن مقدار ۰.۲۵٪ الیاف خرما می تواند مقاومت فشاری خشت را تا حدود ۵۰٪ و افزودن ۱٪ الیاف مقاومت کششی آن را تا بیش از ۱۰۰٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد. (Manaviparast et al 2025) با مرور پژوهش ها، کاربرد خاکستر پوسته برنج و لجن آهکی را به عنوان مواد دوستدار محیط زیست در تثبیت خاک های رسی معرفی کرده اند. از سوی دیگر، برخی پژوهش ها مانند Sesay et al (2025) نشان داده اند که تثبیت زیستی با استفاده از پلیمرهای طبیعی می تواند استحکام سازه های خشتی را بدون تغییر در ظاهر سنتی آنها افزایش دهد و در عین حال اثرات زیست محیطی محدودی داشته باشد. (Mihic 2025) در پژوهش خود با آسیب شناسی و انجام مطالعات آزمایشگاهی به بررسی میانگین رطوبت دیوارهای خشتی پرداخته و خاک مورد استفاده برای خشت با محتوای شن متوسط ۲.۲٪، ۳۷.۹٪ ماسه، ۴۹.۶٪ سیلت، و ۱۰.۰٪ رس پیشنهاد داده اند. جمع بندی پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه تثبیت خاک و مصالح خاکی و خواص آن حاکی از این است که بیشتر پژوهش های صورت پذیرفته در جهت تغییر در ترکیبات خشت 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 خشت های تولیدی قدم بر می دارد.

در دسته بندی بعدی به بررسی پژوهش های مرتبط با قلعه تاریخی مورچه خورت پرداخته می شود؛ نخستین اسناد درباره بقایا و شواهد معماری در دشت مورچه خورت 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 (Eugène Aubin) و روایت مورخان و جغرافیایان یسانی مانند ابن رسته، حمدالله مستوفی، ابوالحسن قزوینی مروی، استرآبادی، گلستانه، ارباب اصفهانی، رستم الحکما که به توصیف در مورد قلعه مورچه خورت و شرح مختصری از بافت اطراف پرداخته اند، احمدی (۱۳۸۸)، ساختارهای معماری قلعه مورچه خورت 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 باستان شناسی محیطی، بافتی و فضایی مورد مطالعه قرار داده و عوامل تأثیرگذار بر روند شکل گیری و گسترش و ترک سکونتگاه های دشت مورچه خورت را بررسی نموده است، امیرحاجلو و نیستانی (۱۳۹۳) ضمن مطالعه شواهد معماری دوران سلجوقی در دشت بر خوار، به قلعه تاریخی مورچه خورت نیز پرداخته اند. حاجلو و سقایی (۱۴۰۰) مؤلفه های پدافند غیرعامل در سازمان فضایی و کالبد قلعه تاریخی مورچه خورت را مورد سنجش قرار داده اند. لیکن بیشتر مطالعات صورت گرفته در قلعه تاریخی مورچه خورت بیان توصیف کالبدی و روابط فضایی و روند شکل گیری این مجموعه است و به صورت مجزا مطالعه بر روی مصالح این ساختار خشتی صورت نرفته است از طرفی عمده مشکل در رابطه با این ساختارهای گلین فروریختگی و فرسایش پذیری حاصل

از رطوبت است و این قلعه تاریخی مورچه خورت طی چند سال به دلیل عدم امنیت در برابر بارندگی های شدید ناگهانی مهاجرت رخ می دهد و عمده آسیب های وارد شده در حال حاضر عوامل طبیعی از جمله بارندگی است. پیشینه پژوهش های صورت گرفته در مورد قلعه مورچه خورت می توان به این موارد اشاره کرد؛ پژوهش حاضر درصدد بررسی تکنیک های نوین برای تولید مصالح جدید و خشتی نوین مقاوم در برابر رطوبت است که بتواند بر عمر این گنچینه های ارزشمند تاریخی قلعه مورچه خورت بیفزاید و هزینه های اقتصادی حاصل از مرمت های پیاپی را به مرور زمان کاهش دهد.

۳. مبانی نظری پژوهش

روش های زیادی برای مقاوم سازی های گلین در ایران و جهان به صورت سنتی و مدرن مورد استفاده قرار گرفته است که با افزودن مواد مقاوم در بهینه سازی مصالح و مواد تشکیل دهنده خاک می توان گام برداشت (Houben, 1994:7). این مواد افزودنی در مصالح گلین، جهت دوام و استحکام به کار می رود، مهم ترین 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 می گردد (Avrami et al: 2008: 100). از این رو انواع افزودنی ها در جهت تثبیت خاک در دسته بندی زیر معرفی می گردد (جدول ۱).

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 کار گرفته 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

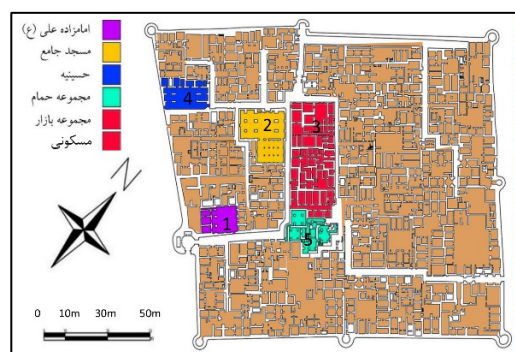
Type of Additive		Primary Materials Used	Properties/Functions
Natural Organic Materials	Plant Origin	Wheat, barley, and rice straw, alfalfa, reeds, chopped bamboo, coconut fibers, pine needles (Warren, 2008: 102; Minke, 2009: 64). Corn stalks, corn cobs, cotton stalks, rice husks, banana stems, palm 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; Esmaceli & 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.

جدول ۲ به معرفی مصالح در مجموعه قلعه مورچه خورت پرداخته شده است.



شکل ۱: تصویر هوایی از قلعه تاریخی مورچه خورت اصفهان

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



شکل ۲: پلان کلی مجموعه و معرفی کاربری های موجود

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

۴. قلعه تاریخی مورچه خورت

روستای مورچه خورت دارای قلعه ای کهن و وسیع با ساختار معماری پیچیده، چندطبقه ای دارای بارویی محکم و بلند و چهار برج مدور در گوشه ها و چهار نیم دایره 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 مرور ایام از ارتفاع آن کاسته شده است، نگهداری می شود. گذرها و ساباطها با عبور از میان خانه ها و فضاهای عمومی از جمله مسجد جامع، مجموعه حمام، امامزاده علی (ع)، حسینیه، راسته بازار و نمازخانه ترکیب منحصربه فردی از فضاهای ناب معماری را به وجود آورده است. تاریخ مستندی از زمان ساخت قلعه مورچه خورت در دست نیست، اما با گذری در فضاهای آن می توان نمونه هایی از معماری دوران ایلخانی، صفویه و قاجار را که در کنار یکدیگر قرار گرفته اند ملاحظه نمود (شکل ۱ و ۲).

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 مترئال همساز با اقلیم منطقه است، علاوه بر آن در اجرای پی خانه ها از سنگ لاشه به دلیل مقاومت در برابر فرسایش و از چوب نیز برای نعل درگاه ها و شیر سرها، درب و پنجره استفاده شده است، در

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, <i>kolombo</i> vaults, arches (<i>tuiẓeh</i> arches)	Adobe Brick (<i>Khesbt</i>)
	Building foundations, wells, borders around gardens/courtyards	Stone
	Doors and windows of historical buildings, ceiling, landings, and thresholds	Wood
	Staircases	Baked Brick (<i>Ajor</i>)
	Interior coatings/plaster	Gypsum (<i>Gach</i>)
	Interior coatings/plaster	Clay and Gypsum (<i>Gach-o-Khak</i>)
	Interior and exterior coatings/plaster	Straw-Clay Render (<i>Kāhgeḥ</i>)
	Clay mortar (for laying bricks in interior/exterior walls and flat/curved roofs)	Mortar (<i>Melāt</i>)
Historical Bathhouse of Morchekhort Castle	Preparation of lime-clay mortar and straw-clay render	Clay (<i>Khak-e-Ras</i>)
	All piers (<i>jerẓ-hā</i>), arches (<i>tuiẓeh</i> arches)	Baked Brick (<i>Ajor</i>)
	Exterior walls, paving/flooring, basin (<i>bōẓ</i>), vestibule (<i>kafsbkan</i>), changing room (<i>sarbineh</i>), columns, stairs, foundation	Stone
	Entrance door, vestibule (<i>kafsbkan</i>)	Wood
	Lime-clay, <i>sārij</i> (hydraulic lime mortar), sand-lime, <i>pīb-āro</i> (traditional fatty mortar)	Mortars (<i>Melāt-hā</i>)
Historical Mosque of Morchekhort Castle	Probable foundation of the structure	Lime-Grout (<i>Shafteh Abak</i>)
	Probable foundation of the structure, columns of the northern prayer hall (<i>Shabestan</i>)	Stone
	Flooring, walls, courtyard facade, vaulting of the winter prayer hall	Baked Brick (<i>Ajor</i>)
	All piers (<i>jerẓ-hā</i>)	Adobe Brick (<i>Khesbt</i>)
	Wainscoting of the southwestern and northeastern prayer halls, flooring of the northeastern prayer hall	Tile (<i>Kāshī</i>)
	Lime-grout (<i>Shafteh Abak</i>), clay, straw-clay (<i>Kāhgeḥ</i>), sime-clay (<i>Simgol</i>), gypsum, gypsum and clay (binder for adobes, interior/exterior finishes, roof covering)	Mortars (<i>Melāt-hā</i>)



شکل ۳: برآورد فراوانی خشت در قلعه تاریخی مورچه خورت

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



شکل ۴: ایجاد شیار فرسودگی در بدنه و جای شیار به خاطر تغییر عملکرد ناودان ها

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

عمده ملات مورد استفاده نیز ملات کاهگل است، برج اصلی لاشه سنگ با ملات گل آهک و خشت و چینه در بدنه اصلی به همراه کاهگل که هر چند ردیف از آجر برای یکنواختی و همگنی در بدنه استفاده شده است. اندازه خشت ها در قلعه مورچه خورت متفاوت است خشت های ۲۳*۲۳*۶ سانت و ۲۷*۲۷*۷ سانت و قسمت هایی نیز با درصد فراوانی ۲۵*۲۵*۵ سانت یافت شد.

۵. مواد و روش

این پژوهش از نظر هدف یک پژوهش کاربردی است که هدف آن سنجش تکنیک های نوین در جهت مقاومت سازی ساختارهای خشتی است و از لحاظ ماهیت ترکیبی (کمی، کیفی) است این تحقیق از نظر راهبرد پیمایشی (کیفی) است و باهدف توصیف و اکتشاف آسیب های موجود به صورت میدانی گام در بهبود کیفیت مصالح این مجموعه گلین برمی دارد و از دانش پیشینیان برای ساخت خشت استفاده می کند، باتوجه به اینکه سنجش شیوه های ساخت خشت جدید از طریق مطالعات آزمایشی است به صورت کمی صورت می گیرد و راهبرد تجربی را به همراه دارد و به پیگیری بین رابطه علت و معلول (فناوری نوین در مقاومت سازی) و سنجش خشت در

این مجموعه که در حیطه پژوهش های کمی هست، قدم برداشته و در بخش آزمایشگاهی به ساختارشناسی مواد و مصالح به کاررفته در سازه های خشتی می پردازد و در پایان راهبرد استدلال منطقی نیز در این پژوهش دخیل است چرا که در پایان با سنجش فرضیه پژوهش در مورد مقاومت سازی و شیوه های به کارگیری اصول فناوری در خشت گام برمی دارد.

۵-۱. معرفی آزمایشات مورد استفاده در این پژوهش

این پژوهش با به کارگیری تکنیک های نوین، زمینه افزایش مقاومت در برابر انواع رطوبت در ساختارهای گلین را فراهم می کند، کلیه آزمایش ها صورت گرفته جهت بررسی مقاومت فشاری و میزان رطوبت نفوذی در خشت های 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).

جدول ۴: 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)

۲-۵. افزودنی های مورد استفاده در این پژوهش

امولسیون سینتتیک ضد آب 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 مکانیسم هایی مانند هم زدن تولید می شوند، برخی از ویژگی های امولسیون سینتتیک (جدول ۴) این است که به راحتی مورد مصرف قرار می گیرد، ازدیاد مقاومت استحکام سطوح، جلوگیری از نفوذ آب، ایجاد مقاومت در برابر سائیدگی، ایجاد حالت روانی در مصالح، آسان کردن 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 پر کردن درزهای مواجه با آب، و به طور کلی هر جا نیاز به چسبندگی بیشتر ملات باشد.

افزودن الیاف پلی پروپیلن به ملات جهت جلوگیری از ترک خوردگی و جمع شدگی ایده جدیدی نیست و شواهدی از کاربرد کاه و موی اسب و در هزاران سال قبل در گل و ساروج وجود دارد. اصولاً تمامی مخلوط های گچی و سیمانی به طور طبیعی تمایل به جمع شدگی دارند؛ از این رو به کارگیری الیاف مذکور در مخلوط های یاد شده تأثیر قابل توجهی در جلوگیری از وقوع چنین پدیده ای دارد (جدول ۵).

جدول ۵: مشخصات الیاف مصنوعی مورد استفاده (پلی پروپیلن)

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 رزین های پایه آبی است. فرایند تولید آن ها به صورت امولسیون با استفاده از فرایند پلیمریزاسیون در محیط آبی همراه با یک آغازگر می باشد و عمدتاً از آکریلات و متاکریلات بعنوان مونومر در سنتز این نوع از رزین های پایه آب استفاده می شود. به عنوان ماده پایه برای تولید انواع پوشش های عایق سفید بام، عایق بتن، عایق رطوبتی پشت بام، ملات های ساختمانی، چسب کاشی، پوشش های انعطاف پذیر و آب بند 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 ۶: 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/cm ³
Calculated Glass Transition Temperature (Tg)	—	25°C
Average Particle Size	—	0.1 μm

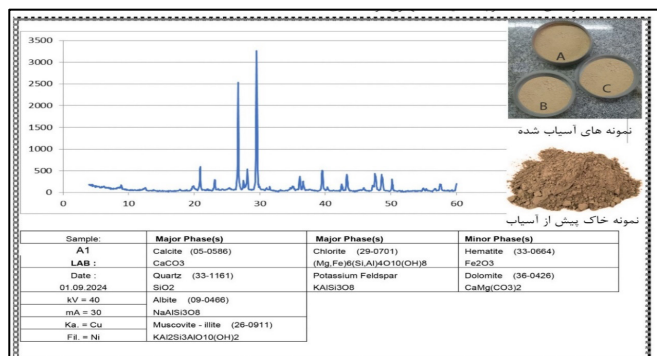
۶. یافته ها

در ابتدا با بررسی نمونه خاک مورچه خورت که خشت ها از آن تولید شده اند و نمونه خشت های مورد استفاده در قلعه مورچه خورت به بررسی مواد تشکیل دهنده آن با استفاده از آزمایش های XRD و آزمایش دانه بندی خاک و خشت اولیه پرداخته شد. ۳ خشت از هر سایز از ۹ نقطه قلعه با توجه به فراوانی ابعاد خشت شناسایی شده گزینش صورت پذیرفت، در ابتدا برای تهیه نمونه های آزمایشگاهی خشت ها آسیاب و سپس مخلوط شدند تا مقدمات قرارگیری در دستگاه XRD فراهم گردد.

۶-۱- آزمایش XRD¹¹

در جهت اینکه خاک مورچه خورت برای تهیه این سازه گلین مورد استفاده قرار گرفته است، بر روی خاک و خشت های قلعه آزمایش XRD صورت

پذیرفت، این آزمایش در شرایط محیطی آزمایشگاهی ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت ۲۶ درصد در تاریخ ۲۰۲۴/۰۹/۰۱ انجام شد. حدود ۱۰۰ میلی گرم (حداقل ۳ گرم نمونه به صورت پودر با سایز ۷۵ میکرون (زیر سرند ۲۰۰ مش)، نمونه باید همگن و معرف باشد) نمونه های آسیاب شده در قطعه ای به ابعاد ۱۱ سانتی متر و ارتفاع ۲ میلی متر قرار گرفت.



شکل ۵: نتایج حاصل از آزمایش XRD بر روی 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 می دهد فازهای اصلی تشکیل دهنده خاک و خشت؛ کلسیت (کلسیم کربنات)، کوارتز (سیلیسیم دی اکسید، سیلیکا، سیلیس)، آلbite (فلدسپات $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)، مسکوویت (ماده معدنی سیلیکات غنی از پتاسیم و آلومینیوم) تشکیل شده است و فازهای فرعی (جزئی)، فلدسپات پتاسیم و کلریت $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si}_3\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ است. با انجام آزمایش دانه بندی بر روی خاک و خشت های قلعه مورچه خورت مشخص گردید، خاکی که خشت های قلعه از آن تهیه شده است دارای ۴۳ درصد لای و رس، ۴۷ درصد ماسه، و حدود ۱۰ درصد شن و بدون قله سنگ است و با سنجش دانه بندی کلوخه (خشت های مورچه خورت حدود ۴۶ درصد لای و رس، ۴۵ درصد ماسه و ۹ درصد شن و بدون قله سنگ است) خشت ها با توجه به فراوانی سایز از سه نمونه انتخاب و راهی آزمایشگاه برای دانه بندی شد.

۶-۲. آزمایش حدود اتربرگ^{۱۲}

در آزمایش حدود اتربرگ، حد مایع یا حد روانی LL (Liquid limit)، حد خمیری PL (Plastic Limit)، شاخص روانی LI (Liquididity Index)، در قلعه مورچه خورت مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش سه بار به صورت متوالی صورت پذیرفته است و نتایج ارائه شده در جدول ۷ جمع نتایج سه آزمایش است (شکل ۷ع).

ترتیب از جمله آخوره کردن کاه و گل، سرند کردن خاک، لگدمال کردن گل و خاک جهت باز شدن دانه ها، افزودن محلول و الیاف، ترکیب الیاف با خشت پایه، ضربه زنی برای تخلیه هوا و متراکم کردن خشت و در نهایت قالب زنی ملات برای تهیه خشت، آماده کردن بستر مسطح پوشیده با کاه انجام شد (شکل ۸ و ۹).



شکل ۸: خشت ها طبق کدهای تهیه شده

Figure 8. Bricks according to the prepared codes



شکل ۹: 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 افزودنی ها شامل الیاف طبیعی (کاه) و الیاف مصنوعی (پروپیلن، تکنیک نوین)، محلول های 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 خشت های تولیدی بر طبق کدگذاری های 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 (کد ۰) 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.



شکل ۶: تعیین حد روانی نمونه ها (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 نمونه ها (آزمایشگاه خاک و مکانیک استان اصفهان، ۱۴۰۳)

(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)

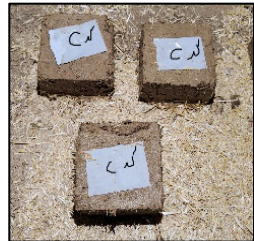
Table 7. Description of the Atterberg limits of soil and clay of Morche-khort castle (Soil and Mechanics Test of Isfahan Province)

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 تشکیل دهنده رس برای خاک و تولید خشت به مقاومت کم و حلت کمی خمیری شناسایی شد. با مشخص شدن ویژگی های خاک اقدام به تهیه خشت های جدید با استفاده از افزودنی های مطرح شده گردید. تمامی مراحل کار به شیوه سنتی به

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	1/2 Soil + 50 g Fiber	1/2 Soil + 1/2 Straw + 50 g Fiber	1/2 Soil + 20 g Solution	1/2 Soil + 1/2 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	1/2 Soil + 20 g Solution	1/2 Soil + 1/2 Straw + 20 g Solution	1/2 Soil + 1/2 Straw + 20 g Fiber + 50 g Solution	1/2 Soil + 1/2 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.

۳-۶. آزمایش باران مصنوعی برای آبشویی مصالح

ابعاد ۱۰*۱۰*۵ سانتی متر تهیه شد پس از خشت شدن خشت در بازه زمانی ۳ روزه مورد مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفت، در این آزمایش از یک دستگاه شبیه ساز 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 سانتی متر با قطر قطراتی حدود ۲ تا ۳ میلی متر، شدت بارندگی ۱۲۰ میلی متر در ساعت و مساحت پلات دستگاه ۰.۲۵ متر بود. در ابتدا نمونه ها قبل از آزمایش باران با ترازوی دیجیتالی به دقت ۱۰۰ میلی گرم توزین و ابعاد آن به طور دقیق با استفاده از کولیس (Vernier

باتوجه به مسئله پژوهش که فرسایش پذیری در برابر عوامل محیطی از جمله رطوبت از معضلات اصلی مصالح خشتی در مجموعه قلعه مورچه خورت است چرا که هر ساله تحت نزولات جوی قسمت اعظمی از این ساختار تخریب می شود، بنابراین با انجام آزمایش باران مصنوعی نمونه خشت های تولیدی در برابر رطوبت مقاوم سنجی شد، این آزمایش با کد استاندارد ASTM D7101 جهت ارزیابی دوام خشت های تولیدی در برابر بارندگی است از هر کد سه نمونه آزمایشگاهی با قالبی به شکل مکعب به



شکل ۱۰: نمونه ها بعد از انجام آزمایش آبشویی

Figure 10. Samples after the water washing test

(Caliper) با دقت ۰.۰۱ میلی متر اندازه گیری شد، خشت تولید شده به منظور خشک شدن 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 سانتی گراد خشک گردید و سپس وزن کشی صورت پذیرفت، هر گروه سه تایی نمونه ها به طور میانگین در ۱۰ دقیقه، ۲۰ دقیقه و ۴۰ دقیقه طی زمان های دوبرابری بر روی صفحه های شیشه ای به ابعاد خشت داخل دستگاه قرار گرفت تا باران متوسط و طبیعی طی دقایق متوالی مدل سازی شود. پس از انجام آزمایش نمونه های خشت فرسایش یافته به آرامی از دستگاه خارج و جهت خشک شدن 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 نمونه ها و میزان هدررفت خشت نسبت به وزن خشت اولیه تحت فرسایش مصنوعی با دستگاه باران ساز محاسبه شد (جدول ۹).

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.

جدول ۹: 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	0.919	-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.

۶-۴. آزمایش غوطه وری خشت

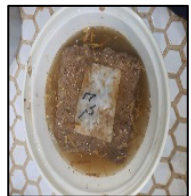
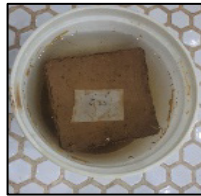
این آزمایش با کد استاندارد ASTM C67 جهت تعیین میزان جذب آب و ارزیابی دوام خشت های تولیدی و میزان مقاومت آن در برابر رطوبت صورت پذیرفت، جهت ارزیابی میزان دوام خشت به آزمایش باران مصنوعی بسنده نشد و برای سنجش سه نمونه خشت تولیدی در هر کد به شکل مکعب به ابعاد ۱۰*۱۰*۵ سانتی متر تهیه شد، خشت های تولیدی بعد از خشک شدن در بازه زمانی سه روزه جهت بررسی آزمایش غوطه وری راهی آزمایشگاه شد، در ابتدا نمونه ها در آون با دمای ۵۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ در آون خشک گردید و سپس وزن کشی تمام نمونه ها انجام شد این آزمایش در شرایط محیطی آزمایشگاهی ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت ۲۶ درصد در تاریخ ۱۴۰۲/۰۸/۲۰ صورت پذیرفت، آزمایش بر روی خشت های تهیه شده با کدگذاری های مشخص انجام شد. دمای آب در دامنه ۲۰-۲۲ درجه سانتی گراد و طی ۲۴ ساعت غوطه وری صورت گرفت میزان pH آب

حدود ۷ (بر طبق استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۷۴۸) و بدون هیچ آلاینده ای در نظر گرفته شد.

نمونه ها در ظرف ها که اطراف آزادی برای حرکت آب داشته باشد قرار گرفت و تا روی خشت پراز آب شد تا طی ساعات متوالی واکنش خشت مشخص گردد. میزان ساعات متلاشی شدن خشت در جدول ۱۰ مشخص شده است. نمونه ها 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 وزن کشی بعد از این ساعات نبود، کد F و D بعد از ۲۴ ساعت از آب خارج و جهت خشت شدن و وزن کشی آماده گردید. پس از انجام آزمایش خشت غوطه ور به آرامی آب خارج و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۵ درجه در آون قرار گرفت تا خشک شود و در نهایت وزن نمونه ها و میزان هدررفت خشت نسبت به وزن خشت اولیه تحت آزمایش غوطه وری 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.

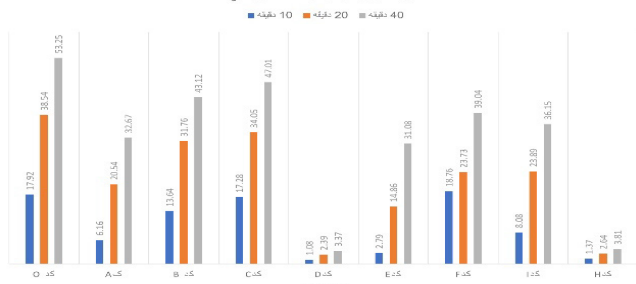
کدها در شکل ۱۱ و ۱۲ نتایج آزمایش غوطه وری و رتبه بندی کدها در شکل ۱۳ و ۱۴ قابل تشریح است.

۵-۶. نتایج آزمایش باران مصنوعی و غوطه وری از نمونه های خشت

تولیدی

یکی از مهمترین مشکلات ساختارهای گلین عدم دوام در برابر عوامل محیطی از جمله رطوبت است و یکی از مهم ترین معضلاتی که ساختارهای گلین با آن مواجه است پیش داوری در مورد ترکیب مصالح جهت حفاظت، مرمت و مقاوم سازی بنا در برابر آسیب های 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 رتبه بندی

آزمایش باران مصنوعی



شکل ۱۱: مقایسه کدها در آزمایش باران مصنوعی

Figure 11. Comparison of codes in artificial rain experiment

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 غوطه‌وری مربوط به کد H و D است و کمترین مقاومت به ترتیب کد A, B, C, E, I, F است. با در کنار یکدیگر قراردادن کدها در آزمایش باران مصنوعی و آزمایش غوطه‌وری میزان مقاومت خشت های تولیدی و اولیه در برابر رطوبت مربوط به کد D و 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.

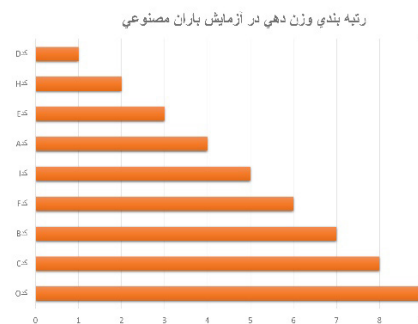
۶-۶. آزمایش مقاومت فشاری خشت

آزمایش مقاومت فشاری در شرایط استاندارد ASTM C109 جهت دستیابی به مقاومت در برابر نیروی فشاری صورت پذیرفت، در این قسمت کدهای H و D که در آزمایش غوطه‌وری و باران مصنوعی هدررفت و میزان جذب رطوبت کمتری داشتند مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت، خشت‌ها با ابعاد ۵*۵*۵ تولیدی در ابتدا به مدت سه روز در فضای آزاد جهت خشک شدن 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 سوهان کشی شد (شکل ۱۵) تا تنش به صورت یکنواخت به نمونه وارد شود. از جک ملات شکن (دستگاه تست مقاومت فشاری) با نرخ بارگذاری یکنواخت حدود ۱ مگاپاسکال بر ثانیه جهت جلوگیری از شکست یکنواخت خشت استفاده شده است (شکل ۱۶) و سپس مقدار حداکثری نیروی وارده بر سطح مقطع خشت به عنوان مقاومت فشاری ثبت گردید.



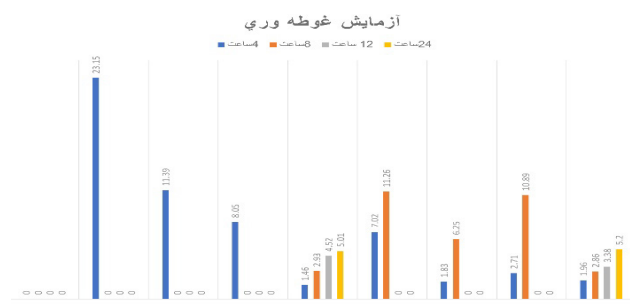
شکل ۱۵: نمونه خشت های سوهان کشی شده از کد H, D, O

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



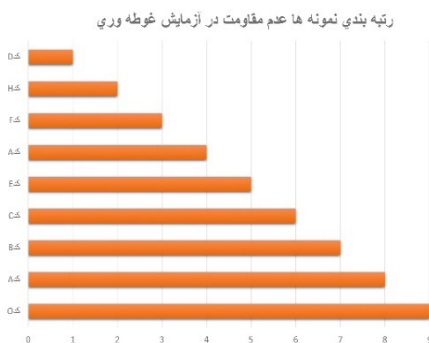
شکل ۱۲: رتبه بندی وزن دهی در آزمایش باران مصنوعی

Figure 12. Weighting ranking in artificial rain experiment



شکل ۱۳: مقایسه کدها در آزمایش غوطه‌وری

Figure 13. Comparison of codes in immersion testing



شکل ۱۴: رتبه دهی کدها در آزمایش غوطه‌وری

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، ۲۰ و ۴۰ دقیقه انجام شد این سنجش بعد از خشک شدن نمونه ها در اون 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, A, E, I, F 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

۶-۷. 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 کد D و H با هدف عمق نفوذ بر اساس زمان و فشار است. شرایط خشک شدن نمونه ها طبق سایر آزمایشات صورت گرفته در این پژوهش است، نمونه ها به گونه ای تنظیم شد (شکل ۱۷ و ۱۸) که فشار آب بر روی سطح مشخص عمل کند و بعد اعمال فشار در سه روز متوالی نمونه ها شکسته و میزان نفوذ پذیری آب مورد اندازه گیری قرار گرفت (شکل ۲۰ و ۲۱ و ۲۲) و بدین وسیله عمق نفوذ پذیری 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 گرفت به این ترتیب که اثر ماده رنگی در مصالح پس از شکافت نمونه به روش آزمایش برزلی (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 نفوذ پذیری در دو کد H و D در جدول ۱۳ نشان می دهد، میزان نفوذ آب تحت فشار 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.



شکل ۱۶: 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 نمونه H 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 اولیه ۰.۲ (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 (جدول ۱۲).

جدول ۱۲: 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



شکل ۱۷: آزمایش نفوذ پذیری نمونه D

Figure 17. Permeability test of sample D



شکل ۱۸: آزمایش نفوذ پذیری نمونه H

Figure 18. Permeability test of sample H



شکل ۱۹: آزمایش نفوذ پذیری خشت اولیه

Figure 19. Primary brick permeability test



شکل ۲۰: مایع رنگی روی نمونه ها

Figure 20. Colored liquid on samples



شکل ۲۱: میزان اندازه گیری کد D

Figure 21. Code D measurement rate



شکل ۲۲: میزان اندازه گیری کد H

Figure 22. H-code measurement rate

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

۶-۸. بحث و تحلیل

در این پژوهش در ابتدا با سنجش و مطالعه خاک قلعه تاریخی مورچه خورت به صورت 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 قلوه سنگ 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 تشکیل دهنده رس برای خاک و تولید خشت به مقاومت کم شناسایی شد. سپس باتوجه به دستورالعمل های خشت تولیدی در گذشته و افزودنی های معرفی شده در این پژوهش دست به تولید خشت جدید زده شد. آزمایش غوطه وری و باران مصنوعی جهت سنجش میزان مقاومت خشت های تولیدی از لحاظ شکلی پرداخته شد در آزمایش باران مصنوعی که به مدت های ۱۰، ۲۰، ۴۰ دقیقه و آزمایش غوطه وری که به مدت ۴ و ۱۲ و ۲۴ طی چهار مرحله مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت کد H و کد D بالاترین میزان جهت حفظ شکل ظاهری و درصد فشردگی اجزای تشکیل دهنده را دارا بودند و میزان ماندگاری و متلاشی شدن آنها نیز طی ساعات ماقبل و بعد ثبت گردید برای تولید این کدها از ترکیبات خاک + کاه (خشت پایه) + محلول امولسیون سینتتیک (کد D) 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 (کد O) است و به ترتیب کد C با ترکیب خاک + محلول رزین امولسیون اکریلیک پس از کد O دارای کمترین مقاومت را دارا می باشد ترکیبات استفاده شده در این کد بدون الیاف، تأثیر 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 تأکید بر تأثیر مستقیم محلول ها بر میزان چسبندگی و تثبیت خاک جهت مقاومت در برابر رطوبت است که نتایج

آزمایش غوطه وری نیز تأکید بر این مسئله دارد چرا که کد C بدون الیاف در آزمایش غوطه وری دوتکه و متلاشی گردید و کد B نیز یکی از کدها با کمترین دوام در برابر آزمایش غوطه وری بود. به دنبال آن با بررسی کد H و D تحت آزمایش مقاومت فشاری و درصد نفوذ پذیری بالاترین مقاومت مربوط به نمونه D با بالاترین بار وارده در لحظه شکست ۱۳۵۲ (Kgf) و مقاومت فشاری ۵.۳ مگاپاسکال با ترکیبات خاک + کاه (خشت پایه) + محلول امولسیون سینتتیک و بود و در سنجش نفوذ پذیری رطوبت این دو کد نمونه D حدوداً ۱۸ و نمونه H حدوداً ۲۲ سانتی متر برآورد شد که این اعداد بسیار به هم نزدیک است بنابراین تأثیر محلول امولسیون سینتتیک 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 تولید شده 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 غوطه وری 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 ترکیب خاک + کاه (خشت پایه) + محلول امولسیون سینتتیک بالاترین میزان جهت حفظ شکل ظاهری و درصد فشردگی اجزای تشکیل دهنده را دارا بودند، به دنبال آن در نمونه های گزینش شده تحت آزمایش مقاومت فشاری و درصد نفوذ پذیری، بالاترین مقاومت فشاری و بیشترین درصد مقاومت پذیری در برابر رطوبت مربوط به کد D نسبت به خشت اولیه را است و باتوجه به 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 ۱۵۰۰ کیلوگرم 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 پلی پروپیلن (الیاف مصنوعی، تکنیک نوین) استفاده شده در ترکیبات کد H به جای الیاف گیاهی (کاه، تکنیک سنتی) بر میزان مقاومت پذیری مصالح اولیه در برابر رطوبت تأثیر گذار است ولی ممکن است به مرور زمان طی سالیان بر اثر عوامل محیطی خشت دچار فرسودگی و آبستگی شود، رخ الیاف مشخص و نمای غیر قابل تحمل و سفید رنگی به خشت خواهد دهد، در این میان کدهای فاقد الیاف از انسجام کمتری برخوردار بودند و طی آزمایشات سریع متلاشی شدند و نمونه ها دارای

محللول رزین امولسیون اکریلیک نسبت به محللول 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)+ محللول امولسیون سینتتیک می تواند به عنوان خشت پیشنهادی مقاوم در برابر رطوبت معرفی گردد. براین اساس با کمترین مداخله کالبدی در خشت های 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، به نحوی که اصالت خشت اولیه حفظ شده و از مفهومی عمومی شیوه ساخت آن در گذشته و کسانی که خشت را به خوبی می شناسند، فاصله نگیرد و به افزایش طول عمر آن در برابر رطوبت که یکی از عوامل آسیب رسان جدی به مصالح در این محدوده است کمک شایانی کرده باشد، بنابراین باتوجه به مواد افزودنی به خشت در روند فرسایشی ناشی از رطوبت گام های ارزشمندی باتوجه به آزمایش های صورت گرفته رهنمون گشت و نتایج حاصل از این پژوهش قابل تعمیم به سایر ابنیه با ساختار گلین و ویژگی های 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) در آمریکا 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)، پنجمین دوره همایش متخصصان معماری خشت در رم، ایتالیا (۱۹۸۷)، ششمین دوره حفاظت از معماری خاکی نیومکزیکو آمریکا (۱۹۹۰)، هفتمین دوره لیسون آمریکا (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 ساتافه، نیو مکزیکو، ایالات متحده آمریکا (Terra 2022) و آخرین اجلاس آن قرار است در دانشگاه کوئتکا، 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 گام ۱۲۵، انجام شده است.
۱۲. آزمایش در آزمایشگاه خاک و مکانیک اصفهان با دستگاه کاساگران دستی صورت پذیرفته است.

سیاسگزاری: 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 دانشکده های هنرهای زیبای دانشگاه تهران انجام شده است. نگارنده اول برخورد واجب میداند از زحمات خانم دکتر سمیه فدایی نژاد بهرامچردی جهت هدایت این پژوهش سیاسگزاری 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

- 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]

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

- 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]
- Esmaili, 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 in Adobe 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, J& 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