

# The study of the Characteristics of Clay in Four Historical Monuments in Kashan

**Fatemeh Parchebaf Motlagh**

Lecturer, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran

**Babak Alemi, PhD.** 

Associate Professor, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran

**Amir Hossein Sadeghpour, PhD.**

Associate Professor, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran

**Fatemeh Parchebaf Motlagh, Babak Alemi, Amir Hossein Sadeghpour., 2024.** The study of the Characteristics of Clay in Four Historical Monuments in Kashan. *Soffeh* 34 (4): 107-127.

**DOI:** [10.48308/soffeh.2024.105153](https://doi.org/10.48308/soffeh.2024.105153)

Received: January 14, 2024

Accepted: May 12, 2024

(Pages: 107-127)

## Abstract:

**Background and objectives:** Clay is one of the main earth materials used in architectural works from the past, with Iran considered as having one of the oldest histories of using earth materials based on climatic criteria. Over time, the use of these materials fell into neglect despite the county's hot, arid climate and clay being a cheap, recyclable and highly accessible material. The importance of knowing these materials and analysing them during history is, therefore, particularly high. In addition, the sustainability and durability of some historic mud-brick buildings make it necessary to analyse and examine their materials in order to take advantage of the valuable experiences of the past and reveal their underlying techniques. Using clay and providing new solutions, therefore, is arguably pointless without examining and analysing the past. This is why we need to examine characteristic features of their construction in different historical periods to devise new solutions for their strengthening. With the aim of knowing the quantitative and geometric aspects of clay used in Iran's historical buildings, this research has investigated these materials in historical buildings from different periods in Kashan, a rich example of the country's historical textures. This study concernstheir appearance, chemical compounds, physical characteristics and

## Keywords:

Clay, Historical city of Kashan, Basic test, Mechanical test, Chemical test.



SOFFEH

*Soffeh Journal*, Shahid Beheshti University, Vol. 34, Issue 4, No. 107, 2025  ISSN: 1683-870X

\*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

\*. Corresponding Author Email Address: [alemi@kashanu.ac.ir](mailto:alemi@kashanu.ac.ir)

<http://dx.doi.org/10.48308/soffeh.2024.105153>

techniques used in them, through library and field studies and various experiments and analyses of them. The results of the research can help us better know the materials and structurally analyse buildings in order to identify and strengthen clay structures.

**Methods:** The research method is quantitative and based on field studies and laboratory experiments. The tests are divided into three categories. The first, basic tests, include density, specific gravity, moisture content, granulation and hydrometry and Atterberg limits. The second category includes compressive and bending strength, and the third category is the chemical analysis by XRD method. These tests were performed based on ASTM as well as the National Standards of Iran (ISIRI). Four clay samples were tested from Kashan historical buildings ranging from the Neolithic to the Qajar periods. The samples were named with the letter C (standing for 'clay') and numbered in the order of old to new.

**Results & Conclusion:** According to the tests conducted, one of the physical characteristics that are effective in the strength and quality of the samples is the specific weight or density. In this test, sample C3 had the highest specific weight and sample C2 also had a high specific weight. Moisture content is the amount of moisture in the sample and the lower it is, the better it is for the sample. This is because water absorption in wetter seasons causes contraction and expansion and eventually cracks. According to the obtained results, sample C2 had the lowest and sample C3 had the highest percentage of moisture. According to the location of sample C3, originated from the Seljuk fence, with a green space and a fountain currently in its vicinity, more moisture has been absorbed by the sample.

In the granulation and hydrometric test, all the samples had suitable and non-uniform soil and the amount of sand in C3 and C2 samples was more than other samples. In sample C1, the percentage of gravel was much higher than other samples and due to a lot of gravel in the clay, it can be said that the grading of this sample was more inappropriate than other samples. Also, in the Atterberg test, sample C1 had inorganic clay with medium pasting properties, and samples C2 and C3 had inorganic clay with low pasting properties. While the C4 sample had inorganic silt with low compressibility, it is better to use clay to prepare clay, because it has more adhesion and the soil grains are better placed next to each other. Therefore, the soil in C4 was not found particularly suitable for making clay.

The results of compressive and bending strength tests on clay samples are relatively similar. Sample C3 had the highest compressive and

bending strength, followed by sample C2. The lowest amount of mechanical resistance was for sample C1. The mechanical resistance of sample C4 was also low and the reason for this was the use of recycled materials and poor-quality soil. Considering this issue, it can be said that soil has a direct effect on the physical and mechanical characteristics of the clay. In fact, in samples C3 and C2, the distribution of grain size was more suitable and the percentage of sand was higher, and this issue had created a uniform and dense texture between the grains and a stronger connection between them. Samples C1 and C4 also had non-extensive granulation, and this had prevented the creation of a uniform texture and less compressibility of the clay mass. In other words, the grain size and type of soil had a direct effect on the structure and strength of clay made from it. In addition, the specific weight and moisture content were also related to the mechanical structure of clay. According to the examination of clay samples, in general, it can be said that with the increase in specific weight and decrease in moisture content, the mechanical properties of clay, including compressive strength and bending strength, increase. In addition, based on the results of chemical tests, there are quartz, calcite and albite phases in all samples, and the higher the albite content in the samples, the higher the mechanical resistance.

# مطالعه ویژگی‌های خشت در چهار بنای تاریخی کاشان<sup>۱</sup>

فاطمه پارچه‌باف مطلق<sup>۲</sup>

مربی دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران



بابک عالمی<sup>۳</sup>

دانشیار دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

امیرحسین صادقیپور<sup>۴</sup>

دانشیار دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

دریافت: ۲۴ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۳

(صفحه ۱۰۷-۱۲۷)

فاطمه پارچه‌باف مطلق، بابک عالمی، امیرحسین صادقیپور. ۱۴۰۳. مطالعه ویژگی‌های خشت در چهار بنای تاریخی کاشان. فصلنامه علمی معماری و شهرسازی صفحه ۳۴ (۴): ۱۰۷-۱۲۷.

کلیدواژگان: خشت، شهر تاریخی کاشان، آزمایش پایه، آزمایش مکانیکی، آزمایش شیمیایی.

## چکیده

**اهداف و پیشینه:** خشت از انواع مصالح اصلی با منشأ خاک در آثار معماری گلی به‌جامانده از دوران گذشته است و ایران در استفاده از این مصالح با تکیه بر معیارهای اقلیمی، از کهن‌ترین و باسابقه‌ترین کشورهاست. با گذشت زمان، کاربرد این مصالح کمتر و به آن بی‌توجهی می‌شود، در صورتی که بخش زیادی از ایران را مناطق گرم، خشک، و کویری تشکیل داده است و خشت همچنان یک مصالح ارزان، بازیافت‌پذیر، و اقلیمی با میزان دسترسی بالا در این مناطق است. بنابراین اهمیت شناخت این مصالح و تحلیل آن در دوران‌های مختلف و بهره‌گیری از تجارب گذشته دوچندان می‌شود. علاوه بر این پایداری و مانایی برخی بناهای خشتی تاریخی تا امروز، تحلیل و بررسی مصالح موجود در این ابنیه را ضروری می‌کند تا از تجارب گران‌بهای ساخت و پرداخت خشت در ادوار تاریخی بهره‌گیری و روش‌های نهفته در آنها آشکار شود. به همین دلیل، می‌توان گفت استفاده از خشت و بیان راهکارهای مقاومت‌سازی آن، بدون بررسی و تحلیل کار گذشتگان، کار درست و اصولی‌ای نیست و باید در وهله اول، ویژگی‌های شاخص ساخت این مصالح در ادوار مختلف تاریخی بررسی شود تا زمینه‌ای برای ساخت این مصالح و انجام پژوهش‌هایی در مورد راهکارهای اصولی استفاده

و مقاومت‌سازی آنها باشد. بنابراین در پژوهش پیش رو با هدف شناخت ابعاد کمی و هندسی خشت‌های به‌کاررفته در بناهای تاریخی ایران، به بررسی این مصالح در بناهای تاریخی متعلق به دوره‌های مختلف شهر کاشان، با عنوان نمونه‌ای غنی از بافت‌های تاریخی کشور، پرداخته شده است. **مواد و روش‌ها:** روش تحقیق کمی و مبتنی بر مطالعات میدانی و فعالیت‌های آزمایشگاهی است. آزمایش‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، آزمایشات پایه شامل چگالی، وزن مخصوص، درصد رطوبت، دانه‌بندی، هیدرومتری، و حدود اتربرگ است، دسته دوم تست‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی، و دسته سوم آزمایش‌های شیمیایی و آنالیز شیمیایی به روش XRD است. این تست‌ها بر اساس استانداردهای ASTM و همچنین استاندارد ملی ایران (ISIRI) انجام شده‌اند. در این تحقیق چهار نمونه خشت از بناهای تاریخی کاشان از عصر نوسنگی تا دوره قاجار آزمایش شده‌اند. نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها به این صورت است که این نمونه‌ها با حرف C (ابتدای کلمه خشت به انگلیسی) نشان داده شده و با توجه به بازه زمانی از گذشته تا امروز شماره‌گذاری شده‌اند. **نتایج و جمع‌بندی:** از جمله مشخصات فیزیکی مؤثر در مقاومت و کیفیت نمونه‌ها، وزن مخصوص یا دانسیته است. بر اساس برآوردی از آزمایشات، وزن مخصوص برای نمونه C3 بیشترین و برای نمونه C2 نیز بالاست. درصد رطوبت نیز، میزان

۱. این مقاله برگرفته از رساله کارشناسی ارشد نگارنده اول است با عنوان «مطالعه ویژگی‌های تاریخی و فنی خشت و آجر در بناهای تاریخی کاشان و طراحی یک نشانه شهری به‌منظور تأکید بر این مصالح»، که در بهمن‌ماه سال ۱۴۰۲ به راهنمایی نگارندگان دوم و سوم در دانشکده معماری و هنر دانشگاه کاشان دفاع شده است.

۲. کارشناسی ارشد تکنولوژی معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران  
fparchebaf@yahoo.com

۳. نویسنده مسئول  
alemi@kashanu.ac.ir  
4. sadeghpour@kashanu.ac.ir



فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی و چهارم، زمستان ۱۴۰۳، شماره ۴، پیاپی: ۱۰۷  
\*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی و چهارم، زمستان ۱۴۰۳، شماره ۴، پیاپی: ۱۰۷  
\*. Corresponding Author Email Address: [alemi@kashanu.ac.ir](mailto:alemi@kashanu.ac.ir)  
<http://dx.doi.org/10.48308/soffeh.2024.105153>

## پرسش‌های تحقیق

۱. مشخصات پایه و فیزیکی نمونه‌های خشتی انتخاب شده چیست؟
۲. مقاومت نمونه‌های مذکور در برابر فشار و خمش چگونه است؟
۳. مقایسه خشت‌های مربوط به دوره‌های مختلف، در مجموع، چه نتایجی در پی دارد؟

رطوبت موجود در نمونه است و هرچه میزان آن کمتر باشد، برای نمونه مناسب‌تر است؛ زیرا جذب آب توسط نمونه در فصول مختلف، سبب انقباض و انبساط نمونه می‌شود و ایجاد ترک می‌کند. با توجه به نتایج پژوهش، نمونه C2 دارای کمترین و نمونه C3 دارای بیشترین میزان درصد رطوبت است. با توجه به محل نمونه C3، که از حصار سلجوقی تهیه گردیده و در حال حاضر فضای سبز و آب‌نما در مجاورت آن قرار دارد، رطوبت بیشتری جذب کرده است. در آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری نیز ثابت می‌شود که همه نمونه‌ها دارای خاک مناسب و غیریکنواخت هستند و میزان ماسه در نمونه‌های C3 و C2 نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است. در نمونه C1 نیز درصد شن نسبت به نمونه‌های دیگر بسیار بیشتر و با توجه به نامناسب بودن وجود شن زیاد در خشت، می‌توان گفت دانه‌بندی این نمونه از سایر نمونه‌ها نامناسب‌تر است. همچنین طبق نتایج آزمایش حدود اتربرگ نیز نمونه C1 دارای رس غیرآلی با خاصیت خمیری متوسط و نمونه‌های C2 و C3 رس غیرآلی با خاصیت خمیری پایین هستند درحالی‌که نمونه C4 دارای لای یا سیلت غیرآلی با تراکم‌پذیری پایین است و بنابراین برای تهیه خشت استفاده از خاک رس بهتر است؛ زیرا چسبندگی بیشتری دارد و دانه‌های خاک در کنار یکدیگر بهتر قرار می‌گیرند. بنابراین نوع خاک نمونه C4 برای ساخت خشت چندان مناسب نیست. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی روی نمونه‌های خشتی نسبتاً مشابه است. نمونه C3 بیشترین میزان مقاومت فشاری و خمشی و پس از آن نمونه C2 مقاومت بالایی دارد. کمترین میزان مقاومت مکانیکی نیز برای نمونه C1 است. مقاومت مکانیکی نمونه C4 نیز پایین و دلیل آن، استفاده از مصالح بازیافتی و خاک نامرغوب بوده است. با توجه به این مطالب، می‌توان گفت خاک در مشخصات فیزیکی و مکانیکی خشت اثر مستقیم دارد. درواقع نمونه‌های C3 و C2 توزیع دانه‌بندی مناسب‌تر و درصد ماسه بالاتری دارند و این باعث ایجاد بافت یکنواخت و مترکم بین دانه‌ها و اتصال قوی‌تری بین آنها شده است و نمونه‌های C1 و C4 دارای دانه‌بندی غیرگسترده هستند و این موضوع باعث جلوگیری از ایجاد بافت یکنواخت و تراکم‌پذیری کمتر توده خشت گردیده است؛ یعنی دانه‌بندی و جنس خاک تأثیر مستقیم بر ساختار و مقاومت خشت ساخته شده از آن دارد. علاوه بر این وزن مخصوص و درصد رطوبت نیز با ساختار مکانیکی خشت رابطه دارند. با توجه به بررسی نمونه‌های خشتی می‌توان گفت، به‌طور کلی با افزایش وزن مخصوص و کاهش درصد رطوبت، خواص مکانیکی خشت، شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، بیشتر می‌شوند. علاوه بر این طبق نتایج آزمایش شیمیایی در همه نمونه‌ها، فازهای کوارتز، کلسیت، و آلبیت وجود دارد و هرچه میزان آلبیت در نمونه‌ها بیشتر باشد، میزان مقاومت مکانیکی نیز افزون‌تر است.

## مقدمه

خشت از انواع مصالح اصلی با منشأ خاک در آثار معماری به‌جامانده از دوران گذشته است و ایران در استفاده از این مصالح با تکیه بر معیارهای اقلیمی، از کهن‌ترین و با سابقه‌ترین کشورها محسوب می‌شود. با گذشت زمان، با فراموشی، رها شدن، تخریب تدریجی آثار، و از بین رفتن دانش بومی و سنتی، فرایند ساخت و کاربرد خشت در ساختمان، تقریباً متوقف و فراموش شده که



شناخت مصالح در تحلیل‌های سازه‌ای بنا به‌منظور شناسایی و تقویت ساختار بنا مؤثر باشد.

## ۱. پیشینه تحقیق

توجه به معماری خشتی و استفاده از آن، به‌دلایل محیط زیستی و ... در چند دهه اخیر در جهان، رشد کرده است. این تحول، در مجموعه‌ای از کنفرانس‌های بین‌المللی متعددی که در سراسر جهان برگزار شده، نمایان است. از سال ۱۹۷۲ این کنفرانس‌ها کم‌کم زیادی به درک خاک، منشأ این مصالح ساختمانی مناسب و بادوام، کرده و بیانگر این موضوع بوده‌اند که از نظر تاریخی، استفاده از خشت یک انتخاب آگاهانه و مطلوب بوده است. در واقع نیاز، در جای خود، ضرورت حمایت از انجام پژوهش‌های جدید را ایجاد کرده است.<sup>۵</sup> به‌همین منظور، در جهت استفاده از خشت و به‌کارگیری آن در بناهای امروزی، در جهان استانداردها و توصیه‌نامه‌های فنی برای مصالح و بناهای خشتی تدوین شده است که از میان آنها می‌توان استاندارد فنی ساختمان‌های خشتی پرو،<sup>۶</sup> استاندارد طراحی مهندسی ساختمان‌های خشتی نیوزیلند<sup>۷</sup>، آیین‌نامه جدید مصالح ساختمانی خشتی مکزیک<sup>۸</sup>، و کتاب راهنمای ساختمان خشتی استرالیا<sup>۹</sup> را نام برد که نسبت به سایر استانداردها کامل‌تر و مفصل‌تر هستند. علاوه‌براین، راهنمای روش‌های آزمایش بلوک‌های خشتی فشرده<sup>۱۰</sup> که مرکز توسعه تجارت تدوین کرده است، یکی از کامل‌ترین دستورالعمل‌ها برای انجام آزمایش‌های مختلف خشت، شامل آزمایش‌های مربوط به مصالح خام (قبل از ساخت خشت)، آزمایش‌های مربوط به ساخت خشت و آزمایش‌های مربوط به خشت ساخته‌شده است.<sup>۱۱</sup> و معاونت مسکن و ساختمان وزارت راه و شهرسازی نیز، مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان را شامل قواعدی برای ساختمان‌های بنایی خشتی، آجری، و سنتی تدوین کرده است.<sup>۱۲</sup> علاوه‌براین، پژوهش‌هایی در

این موضوع، تحقیق و بررسی در این باره را ضروری می‌کند تا مقدمه‌ای برای گسترش، درک، و حفاظت از معماری سنتی فراهم آید. با توجه به اینکه بخش زیادی از ایران را مناطق گرم، خشک، و کویری تشکیل داده و خشت همچنان یک مصالح ارزان، بازیافت‌پذیر، و اقلیمی با میزان دسترسی بالا در این مناطق است، اهمیت شناخت این مصالح و تحلیل آن در دوران‌های مختلف و بهره‌گیری از تجارب گذشته دوجندان می‌شود. بنابراین حذف و بی‌توجهی به مصالح بومی راهکار درست و مناسبی به‌نظر نمی‌رسد، به‌خصوص که هرگونه شناخت، آسیب‌شناسی، و بیان راهکار برای حفظ، تقویت، یا مرمت هر بنای تاریخی نیاز به آگاهی از ویژگی‌های مصالح آن دارد که مهم‌ترین آنها خشت است. پایدار بودن و مانایی برخی بناهای خشتی تاریخی تا امروز، تحلیل و بررسی مصالح موجود در این ابنیه را ضروری می‌نمایند. در این پژوهش با هدف شناخت ابعاد کمی و هندسی خشت‌های به‌کاررفته در بناهای تاریخی ایران، به بررسی این مصالح در بناهای تاریخی متعلق به دوره‌های مختلف شهر کاشان، با عنوان نمونه‌ای غنی از بافت‌های تاریخی کشور، پرداخته شده است. این بافت تاریخی، در مرکز ایران، جایگاه بناهای تاریخی خشتی بسیاری است که قدمت برخی به بیش از هزار سال می‌رسد. بنابراین مطالعه و شناخت خشت در ادوار تاریخی این شهر از نظر هندسه و شکل و مقاومت و خصوصیات دیگر آن می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از نحوه کار استادکاران و سازندگان قدیم، در اختیار بگذارد و روشن کند که ویژگی‌هایش در گذر زمان چه تغییراتی کرده است. این مطالعه شامل تاریخچه بناهای منتخب، و مشخصات ظاهری، ترکیبات شیمیایی، خصوصیات فیزیکی، و فنون به‌کاررفته در آنهاست و از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی و آزمایش‌های مختلف، به تحلیل آنها پرداخته می‌شود. نتایج پژوهش می‌تواند در آگاهی نسبت به

5. E. Avrami, et al., *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation* (Conservation of Earthen Archaeological Sites, 2008).

6. NTE E.080,2000

7. NZS 4297,1998

8. New Mexico administrative code, 2009

9. Peter Walker, *The Australian earth building handbook, HB 195-2002* (Sydney: Standards Australia, 2002).

10. Center for the Development of Enterprise (CDE), 2000

۱۱. سیدامیرمهرداد حجازی و همکاران، «مطالعه تخریب لرزهای یک حجره خشتی در ارگ بم و ارائه طرح مرمت آن»، مرمت و معماری ایران، سال پنجم، ش. ۹ (بهار و تابستان ۱۳۹۴): ۷۱-۸۷.

۱۲. وزارت راه شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان. مقررات ملی ساختمان، مبحث ۸ (تهران: توسعه ایران. ۱۳۸۸).

13. Gernot Minke, *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture* (Berlin, Boston: Birkhäuser – Publishers for Architecture Basel, 2006).

۱۴. حسین زمرشیدی، *معماری ایران: مصالح‌شناسی سنتی* (تهران: زمرد، ۱۳۸۱).

۱۵. حسین مسرت، *از خاک تا خشت: خشت از دیدگاه معماری و مردم‌شناسی* (تهران: یزدا، ۱۳۹۴).

۱۶. رضا رحیم‌نیا و همکاران، «بازشناخت تجربیات معماری بومی در جنوب خراسان، جهت حفاظت و مرمت معماری خشتی»، *مسکن و محیط روستا*، ش. ۱۴۲ (تابستان ۱۳۹۱): ۱۹-۳۲.

۱۷. حسن رحیمی، *مصالح ساختمانی* (تهران: دانشگاه تهران، ۱۳۸۵).

۱۸. لیلا سهیلی‌وند و همکاران، «بررسی توسعه پایدار با مصالح بوم‌آورد خشت و ملات در معماری کویری ایران»، در *مجموعه مقالات همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار* (فارس، استهبان، ۱۳۸۹).

۱۹. مهرداد حجازی و همکاران، «تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته‌شده از خاک اصفهان»، *مسکن و محیط روستا*، ش. ۱۵۱ (پاییز ۱۳۹۳): ۶۷-۸۰.

حوزه شناخت و فنون ساخت خشت صورت گرفته است. مینک در کتاب خود، دستورالعمل‌هایی بر اساس تحقیقات علمی و تجربیات عملی، برای به‌کارگیری مصالح ساختمانی بیان می‌کند.<sup>۱۳</sup> زمرشیدی بر فنون مختلف ساختمان‌سازی اصیل در اقلیم‌های مختلف کشور با مصالحی از قبیل خشت و آجر پرداخته و معتقد است با توجه به کمبود سیمان و فولاد و روش‌های تولید و اجرای آنها و با توجه به توان مالی افراد نیازمند به فضای سکونت، با استفاده از مصالح محلی مانند خاک رس، خشت، و ... می‌توان بناهایی مقاوم بنا کرد.<sup>۱۴</sup> مسرت به گردآوری مطالب گوناگون درباره خشت پرداخته و آن را در دو بخش فنی و معماری، شامل بررسی بناهای تاریخی، چرخه تولید، و عوامل آسیب‌رسان و نگهدارنده خشت و دیگر موارد در فرهنگ مردم بررسی کرده است.<sup>۱۵</sup> رحیم‌نیا و همکاران نیز به بررسی نکات اجرایی ساختارهای خشتی، بر اساس تجارب بومی در جنوب خراسان و توانایی ساکنان برای استفاده در حفاظت و مرمت دیگر ساختارهای خشتی ایران پرداخته و راهکارهایی بدین منظور عرضه کرده‌اند.<sup>۱۶</sup> رحیمی به بررسی مشخصات فنی و فیزیکی خشت و آجر پرداخته و فرایند ساخت انواع مختلف آنها را بیان کرده است.<sup>۱۷</sup> سهیلی‌وند و همکاران نیز روش‌های جدید تثبیت خشت، به‌منزله یک مصالح ساختمانی پایدار، را بررسی و مطالعه کرده و برای ساخت بناهای معماری خشتی و گلی سازگار با اقلیم و منطبق با هویت ایرانی، با لحاظ کردن اصول سازه‌ای در آنها، راهکارهایی داده‌اند.<sup>۱۸</sup> حجازی و همکاران روی ۲۱ نمونه خشت از خاک شمال شرق اصفهان پرداخته و آزمایش مقاومت فشاری، خمشی، سایشی، و وارفتگی روی نمونه‌ها انجام داده‌اند.<sup>۱۹</sup> رحیم‌نیا و همکارش مبحث دامنه خمیری خاک (مقدار رس موجود در خاک) را که یکی از شاخصه‌های اصلی و مهم برای خاک مناسب به‌منظور ساخت خشت است، بررسی کرده و اثر آن را بر مقاومت کششی و

فشاری خشت‌های تثبیت‌شده با سیمان بیان کرده‌اند.<sup>۲۰</sup> هادیان، در یک طرح تحقیقاتی، نمونه‌هایی از خشت‌های به‌کاررفته در محوطه‌های باستانی و بناهای تاریخی مناطق متفاوت جغرافیایی ایران را با آزمایش شیمیایی (XRF)، کانی‌شناسی (XRD) و مکانیکی (دانه‌بندی و شاخص خمیری) بررسی کرده‌اند.<sup>۲۱</sup> پدرام و ابراهیمی در پژوهش خود به بررسی شناخت ویژگی‌های ساختمانی خشت‌های به‌کاررفته در محوطه میراث فرهنگی ارگ تاریخی بم و نقاط ضعف و قوت آنها پرداخته و بر پایه روش‌های تجربی و ترکیبی (فیزیکی - مکانیکی و شیمیایی)، عوامل مؤثر در شکل‌دهی به ساختار و بروز تنش‌های رفتاری مصالح و چگونگی رفع یا تعدیل معایب آنها را مطالعه کرده‌اند.<sup>۲۲</sup> طبسی در جهت استحکام‌بخشی و مرمت بناهای تاریخی کوه خواجه سیستان، با انجام آزمایش‌های مختلف برای بررسی ویژگی‌های خشت‌ها، به آسیب‌شناسی خشت‌های منطقه مذکور پرداخته و ترکیب بهینه و اصلاح‌شده‌ای برای خشت‌های بناهای تاریخی کوه خواجه بیان کرده است.<sup>۲۳</sup> کواکو و مورل، برای بهبود خصوصیات لرزه‌ای خشت، در ابتدا نوع خاک، مشخصات آن، و نحوه تهیه خشت را بررسی کردند و دریافتند که خشک شدن خشت در سایه، باعث ترک نخوردن آن می‌شود.<sup>۲۴</sup> حجازی و همکاران به مطالعه دلایل تخریب یک حجره خشتی در بازار ارگ بم در اثر زلزله پرداختند.<sup>۲۵</sup> همان‌گونه که از نتایج پژوهش‌های انجام‌شده پیداست، این بررسی‌ها کمتر بر بناهای تاریخی یک محدوده زنده شهری متمرکز دارند. اهمیت پژوهش حاضر در این نکته است که بافت تاریخی کاشان دارای سکنه قابل توجه است و شناسایی مصالح اصلی آن از نظر فنی می‌تواند کمک شایانی در حفظ و نگهداری بافت باشد.

۲۰. رضا رحیم‌نیا و داریوش حیدری، «تأثیر دامنه خمیری خاک PI بر مقاومت کششی و فشاری خشت‌های تثبیت‌شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه‌های خشتی»، مرمت آثار و بافت‌های تاریخی - فرهنگی، سال ۱، ش. ۲ (پاییز و زمستان ۱۳۹۰): ۹۱-۱۰۲.

۲۱. منیژه هادیان دهکردی، «مطالعات خاک‌شناسی مصالح خشتی تاریخی و باستانی در مناطق مختلف ایران»، فصلنامه علمی اثر، ش. ۷۵ (زمستان ۱۳۹۶): ۸۵-۹۶.

ت ۱. دسته‌بندی آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش، تنظیم: نگارندگان.

## ۲.۲. مشخصات پایه خشت

مشخصات پایه خشت شامل مشخصاتی از قبیل چگالی، وزن مخصوص، درصد رطوبت، دانه‌بندی و هیدرومتری، و حدود اتربرگ است که در ادامه به‌طور خلاصه به آن پرداخته می‌شود. **چگالی:** چگالی یا وزن مخصوص نسبی بیان‌کننده نسبت جرم واحد حجم آن ماده به جرم واحد حجم آب در ۴ درجه سانتی‌گراد است. چگالی مشخصه‌ای بدون بعد است که سنگینی ماده نسبت به آب را نشان می‌دهد. این مشخصه در مورد خاک‌ها در حدود ۲٫۴ تا ۲٫۹ است و در مورد مصالح دیگر برحسب نوع کانی‌ها و ترکیب شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده آنها متفاوت است.<sup>۳۰</sup>

**وزن مخصوص:** این پارامتر بیانگر مقدار جرم ماده مورد نظر در یک واحد از حجم مصالح است. بنابراین در همه حالات، وزن مخصوص کوچک‌تر و یا مساوی یک است و هرچه این نمایه کوچک‌تر باشد، تخلخل در ذرات ماده بیشتر خواهد بود که کوچک‌ترین وضعیت بیانگر پوکی مصالح است.<sup>۳۱</sup>

**درصد رطوبت:** در ساخت خشت از آب استفاده می‌شود و

## ۲. روش تحقیق

به‌طور کلی این پژوهش با روش کمی، همراه با مشاهدات میدانی انجام شده است. در وهله اول نمونه‌های خشتی از بناهای در دسترس انتخاب و مشخصات ظاهری آنها شناسایی شده‌اند. سپس آزمایش‌هایی مطابق استاندارد ASTM و سازمان ملی استاندارد ایران (ISIRI)، شامل سه دسته کلی آزمایش‌های پایه، آزمایش‌های مکانیکی، و آزمایش شیمیایی، به‌منظور شناسایی مشخصات نمونه‌ها و تجزیه و تحلیل آنها صورت گرفته است. در «ت ۱» آزمایش‌های مذکور و انواع آنها به‌همراه شماره استانداردشان ارائه شده است.

پیش از هرچیز، ضرورت دارد تا برخی مفاهیم مورد استفاده در پژوهش بررسی و بر آنها تدقیق شود. بنابراین ضمن تعریف خشت، با عنوان مصالح زمین‌ساخت، لازم است مشخصات پایه و مشخصات مکانیکی آن بیان و نحوه انجام آزمایش شیمیایی نیز توضیح داده شود تا تحلیل‌ها و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها قابل فهم و شناسایی باشد.

## ۲.۱. تعریف خشت

خشت (خشت خام) گل ورز شده‌ای است که شکل گرفته، قالب خورده، و در نهایت خشک شده است.<sup>۳۶</sup> در فرهنگ فارسی عمید خشت به معنای آجر خام<sup>۳۷</sup> و در فرهنگ فارسی دهخدا به معنای پاره‌ای گل است که آن را در قالب می‌ریزند و زمانی که شکل قالب را گرفت، قالب را از آن خارج می‌کنند و سپس آن را در آفتاب می‌گذارند تا خشک شود و در ساختمان‌سازی از آن استفاده می‌کنند. این پاره گل را، گاه به جای خشت، خشت خام نیز می‌نامند، چون اگر خشت خام را بپزند آجر می‌شود.<sup>۳۸</sup> در فرهنگ لغات انگلیسی نیز «Adobe brick» یا «Clay»، به معنای خشت خام، قطعات بزرگی است که به ابعاد مختلف در قالب‌هایی با خاک رس شکل داده و در آفتاب خشک می‌شوند.<sup>۳۹</sup>

انواع آزمایش‌های انجام شده

آزمایش شیمیایی		آزمایش مکانیکی		آزمایش پایه	
شماره استاندارد	نام آزمایش	شماره استاندارد	نام آزمایش	شماره استاندارد	نام آزمایش
ASTM F3419-22	کانی‌شناسی به روش XRD	ASTM C109-90	مقاومت فشاری	ASTM D854-14	چگالی
		ASTM C293	مقاومت خمشی	ASTM C128 ISIRI 4980	وزن مخصوص
				ASTM D2216 ISIRI 7883	درصد رطوبت
				ASTM D422	دانه‌بندی و هیدرومتری
				ASTM D4318 ISIRI 10731	حدود اتربرگ

جدول ۱ (بالا). حدود جداکننده اندازه دانه‌های خاک، مأخذ: سرمد نه‌ری و کاردان، مرجع کامل شناخت مصالح ساختمانی.

ت ۲ (پایین). حدود اتربرگ، مأخذ: همان.

به دلیل پخته نشدن، خشت درصد رطوبت بالایی نسبت به سایر مصالح دارد. در واقع خشت بعد از ساخت و قبل از خشک شدن، بسته به روش شکل‌دهی، رطوبتی حدود ۷ تا ۳۰٪ دارد. بخش قابل توجهی از این رطوبت از طریق خشک کردن گرفته می‌شود و به رطوبت پایین‌تری در حدود ۲ تا ۵٪ می‌رسد.<sup>۳۳</sup>

**دانه‌بندی و هیدرومتری:** برای آزمایش تعیین دانه‌بندی بخش درشت‌دانه خاک از الک با سایزهای مختلف (بزرگ‌تر از ۰٫۰۷۵ میلی‌متر) استفاده می‌شود. همچنین برای تعیین دانه‌بندی بخش ریزدانه خاک (کوچک‌تر از ۰٫۰۷۵ میلی‌متر) از آزمایش هیدرومتری که اساس کار آن سرعت ته‌نشین شدن اجزای خاک در آب است (قانون استوکس) استفاده می‌شود. برحسب اندازه دانه‌ها، خاک‌ها معمولاً به چهار دسته شن، ماسه، لای،

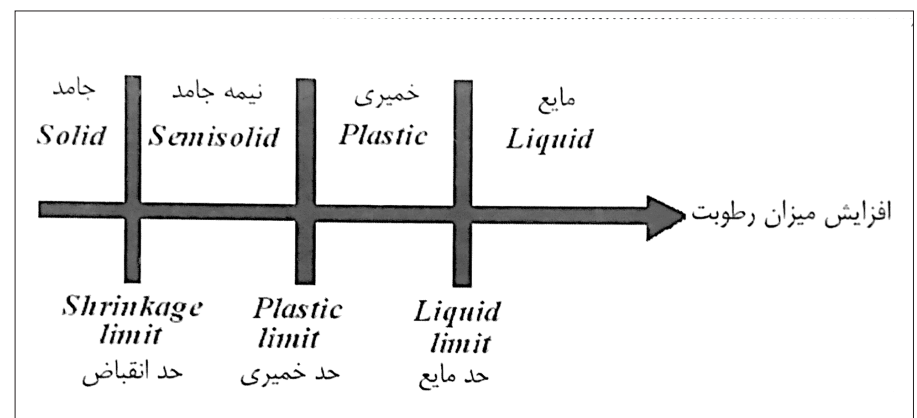
و رس تقسیم می‌شوند. برای دانه‌بندی خاک‌ها، سازمان‌های مختلف حدودی را برای جداکردن نمونه برحسب اندازه دانه‌ها مشخص کرده‌اند که متداول‌ترین آنها حدود پیشنهادی سیستم طبقه‌بندی متحد<sup>۳۳</sup> است. در «جدول ۱» حدود جداکننده اندازه دانه‌های خاک در چند سازمان نشان داده شده است. از آزمایش هیدرومتری همچنین برای به‌دست آوردن منحنی دانه‌بندی خاک‌های ریزدانه استفاده می‌شود.<sup>۳۴</sup>

**حدود اتربرگ:** خاکی که دارای کانی‌های رسی است با مرطوب شدن حالت خمیری می‌گیرد و می‌توان آن را شکل داد. هنگامی که رطوبت بسیار کم است خاک همانند جسم جامد رفتار می‌کند. در رطوبت بسیار بالا خاک می‌تواند، به‌صورت مایع، جاری و روان شود. به‌طور کلی خاک برحسب میزان رطوبت به چهار حالت جامد، نیمه‌جامد، خمیری، و مایع تقسیم می‌شود. درصد رطوبت در نقطه انتقال از جامد به نیمه‌جامد، حد انقباض؛ در نقطه انتقال از نیمه‌جامد به خمیری، حد خمیری؛ و از خمیری به مایع، حد مایع یا حد روانی گفته می‌شود و این حدود به حدود اتربرگ معروف هستند که با به‌دست آوردن این حدود می‌توان نوع خاک و دامنه خمیری آن را نیز به‌دست آورد. در «ت ۲»، حدود اتربرگ مشاهده می‌شود.<sup>۳۵</sup>

اندازه دانه‌ها (برحسب میلی‌متر)				
رس	لای	ماسه	شن	نام سازمان
< ۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲ تا ۰٫۰۰۶	۰٫۰۶ تا ۲	> ۲	انستیتو تکنولوژی ماساچوست (MIT)
< ۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲ تا ۰٫۰۰۶	۰٫۰۶ تا ۲	> ۲	سازمان کشاورزی امریکا (USDA)
< ۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲ تا ۰٫۰۰۶	۰٫۰۶ تا ۲	۲ تا ۷۶٫۲۰	انجمن ادارات و راه و ترابری امریکا (AASHTO)
ریزدانه‌ها ۰٫۰۷۵ تا ۴٫۷۵ (رس و لای) > ۰٫۰۷۵	سیستم طبقه‌بندی متحد (USGS) ۴٫۷۵ تا ۷۶٫۲			

### ۳.۲. مقاومت مکانیکی

مشخصات مکانیکی خشت شامل مقاومت خشت در برابر نیروهای مختلف، از جمله فشار، کشش، برش، و خمش، است. به‌طور کلی خشت از ترکیب مواد مختلف به‌دست می‌آید و در حجم خود، ساختار یکنواخت و یکپارچه‌ای دارد که سبب می‌شود در برابر نیروهای خارجی رفتار یکنواختی داشته باشد. با این حال، می‌توان گفت خشت در برابر نیروهای فشاری، کششی، و خمشی به‌طور یکنواخت عمل می‌کند. خشت، با وجود سادگی ساخت و کم‌هزینه بودن، در دسترس بودن، و مقاومت حرارتی





۲۲. بهنام پدram و افشین ابراهیمی، «بررسی خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خشت‌های به‌کاررفته در محوطه میراث جهانی ارگ بم». فصلنامه پژوهشی باستان‌سنجی، ش. ۲ (پاییز ۱۳۹۶): ۸۱-۱۰۲.

۲۳. محسن طبعی، «ارائه ترکیب بهینه برای استحکام بخشی خشت‌های مصرفی در مرمت بناهای تاریخی کوه خواجه سیستان»، هنرهای زیبا، ش. ۲۳ (پاییز ۱۳۸۴): ۵۳-۵۸.

24. Conand Honoré Kouakou and Jean-Claude Morel, "Strengths and Elasto-plastic Properties of Non-industrial Building Materials Manufactured with Clay as a Natural Binder", *Applied Clay Science*, vol. 44, no. 1 (2009): 27-34.

۲۵. حجازی و همکاران، «مطالعه تخریب لرزه‌ای یک حجره خشتی در ارگ بم و ارائه طرح مرمت آن»، ۷۱-۸۷.

جدول ۲ (بالا). مقاومت فشاری و خمشی خشت‌ها در منابع مختلف، تدوین: نگارندگان.

جدول ۳ (پایین). مشخصات نمونه‌های خشتی، تدوین: نگارندگان.

منبع تحقیق	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	مقاومت خمشی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)
اسماعیلی و قلعه‌نوی، «اثر الیاف نخل خرما و آهک به‌عنوان تثبیت‌کننده طبیعی، بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت)».	۲۱-۷	۷-۲/۷
طبعی، «ارائه ترکیب بهینه برای استحکام بخشی خشت‌های مصرفی در مرمت بناهای تاریخی کوه خواجه سیستان».	۲۰-۴	۸-۶/۲۰
پدram و ابراهیمی، «بررسی خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خشت‌های به‌کاررفته در محوطه میراث جهانی ارگ بم».	۳۹-۱۰	۷۰-۱۰/۳
حجازی و همکاران، «تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته‌شده از خاک اصفهان».	۳۴-۵	۳-۰/۲۰
درمحمدی و همکاران، «بررسی آزمایشگاهی نقش تثبیت مکانیکی در بهبود مقاومت فشاری، کششی، و خمشی خشت».	۴۵-۲۲	۸-۳/۵۰
محدوده تغییرات	۴-۴۵	۰/۲۰-۱۰/۷۰
رابطه براگ:	$\lambda = 2d \sin \theta$	

نوع فازها و ساختار بلورین مواد است. در این روش بر اثر برخورد پرتوهای اشعه ایکس با اتم‌ها یا مولکول‌های یک ماده طبق رابطه براگ که در زیر آمده است، پرتوها پراکنده می‌شوند. شرط پراش یا پراکنده شدن پرتوها آن است که طول موجی کمتر از ۶ آنگستروم داشته باشند. در این صورت طبق رابطه براگ با در دست داشتن طول موج ( $\lambda$ ) و زاویه تابش ( $\theta$ )، فاصله بین صفحات بلوری ( $d$ ) به دست می‌آید. به‌منظور آنالیز مواد با این روش، نمونه‌ها با آسیاب به صورت پودر با قطر ۷۵ میکرون آماده می‌شوند و در حدود ۲۰ میلی‌گرم از نمونه پودر شده بر روی صفحه شیشه‌ای نمونه‌گیر قرار می‌گیرد، سپس آنالیز نمونه‌های پودر شده با دستگاه یادشده انجام می‌شود.<sup>۳۸</sup>

بالا و بازیافت‌پذیر بودن نسبت به مصالح ساختمانی دیگر، دارای مقاومت مکانیکی پایین و مقاومت کم در برابر رطوبت و فشار است.<sup>۳۶</sup> در «جدول ۲» مقاومت فشاری و خمشی خشت‌ها در منابع و تحقیقات انجام‌شده در این زمینه مشاهده می‌شود. مطابق با این جدول مقاومت فشاری خشت در بازه ۴ تا ۴۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است و مقاومت خمشی خشت از ۰/۲ تا ۱۰/۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. با توجه به اعداد جدول می‌توان گفت مقاومت مکانیکی خشت نسبتاً کم است.

## ۴.۲. آزمایش شیمیایی

روش پراش‌سنجی پرتو ایکس<sup>۳۷</sup> روش مستقیمی برای تعیین

شماره نمونه	دوره تاریخی	سال	موقعیت نمونه	محل نمونه‌برداری	منبع شناسایی دوره تاریخی و سال نمونه
نمونه C1	عصر نوسنگی	۴۰۰۰ تا ۳۵۰۰ سال پیش از میلاد	تپه‌های سیلک	دیوار محوطه کشف‌شده موسوم به کارگاه چرم	(زم‌شناسی، معماری ایران: مصالح‌شناسی سنتی)
نمونه C2	دوره‌های صفاریان و سامانیان	۳۰۰-۲۰۰ش	دژ واقع در طسمیجان	دیوار ضلع جنوبی دژ	(نقل قول شفاهی از باستان‌شناس مجموعه، جآوری، ۱۴۰۱)
نمونه C3	دوره سلجوقی	۵۷۳-۴۱۷ش	قلعه جلالی و حصار سلجوقی	دیوار ضلع شرقی حصار	(دانشنامه تاریخ معماری و شهرسازی ایران، شهر، ۱۳۹۸)
نمونه C4	دوره قاجار	۱۳۰۵-۱۱۷۳ش	خانه تاریخی مجاور پاقیان	دیوار حیاط واقع در ضلع جنوبی بنا	(نقل قول شفاهی از مرمتگر مجموعه، اسماعیلی، ۱۴۰۱)

### ۳. معرفی نمونه‌های مورد مطالعه

در این پروژه چهار نمونه خشت در دوره‌های مختلف تاریخی بررسی و تحلیل می‌شود. در «جدول ۳» دوره تاریخی و موقعیت خشت‌ها و آجرهای آزمایش‌شده در این پروژه آمده است. نحوه نام‌گذاری نمونه‌های خشتی بدین‌صورت است که این نمونه‌ها با حرف انگلیسی C (ابتدای کلمه Clay به معنی خشت) نشان داده شده‌اند و به ترتیب دوره زمانی از گذشته تاکنون شماره‌گذاری شده‌اند. علاوه بر دوره تاریخی و قدمت، محل دقیق نمونه‌ها و بنایی که نمونه از آن استخراج شده، در بررسی و تحلیل نمونه‌های خشتی حایز اهمیت است. بنابراین در «ت ۳» موقعیت نمونه‌ها در نقشه همراه با تصاویری از بناهای مورد نظر مشاهده می‌شود.

مشخصات ظاهری نمونه‌های خشتی به درک بهتر و شناخت ویژگی‌های هندسی و تاریخی آنها کمک می‌کند. درواقع نمای خشت‌ها و آجرها دارای اطلاعات و مشخصاتی است که با کمک آنها می‌توان بستر و زمینه مناسب برای

۲۶. مجتبی زرگرزاده دزفولی و همکاران، «خوون چینی، تکامل و تناسب ابعاد آجر در نماسازی‌های آثار معماری دزفول»، مطالعات معماری ایران، ش. ۹ (بهار و تابستان ۱۳۹۵): ۴۷-۶۴.

۲۷. فرهنگ عمید، ذیل: «خشت».

۲۸. لغت‌نامه دهخدا، ذیل: «خشت».

۲۹. سیریل هریس، فرهنگ تشریحی معماری و ساختمان، ترجمه محمدرضا افضلی و مهرداد هاشم‌زاده (تهران: انتشارات دانشیار، ۱۳۸۱).

۳۰. امیر سرمد زهری و محسن کاردان، مرجع کامل شناخت مصالح ساختمانی (تهران: متفکران، ۱۳۸۸).

۳۱. مجتبی امیری و همکاران، شناخت مصالح ساختمانی (تهران: آینده دانش، ۱۳۹۵).

۳۲. باقر حسینی و زهرا سیدین خراسانی، آجر در معماری، زیبایی‌ها و کارایی‌ها (تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۵).

۳۳. سیستم طبقه‌بندی متحد (USGS)

ت ۳. موقعیت نمونه‌های خشتی در نقشه و عکس بناها، مأخذ نقشه اولیه: Google Map، بازرس و عکس‌ها: فاطمه پارچه‌باف مطلق.

مطالعات آسیب‌شناسی و فن‌شناسی نمونه‌ها را مهیا کرد. در «جدول ۴» مشخصات ظاهری نمونه‌ها، شامل ابعاد، بافت، رنگ، فرم، و عملکرد، آمده است. مطابق این جدول، بافت همه خشت‌ها همگن و یکدست، اما بافت نمونه C4 ناهمگن و دارای خرده‌آجر، سنگ، و نخاله است که تأثیر آن در آزمایش‌های انجام‌شده روی این خشت مشهود است. رنگ اکثر نمونه‌ها نیز قهوه‌ای است و تنها نمونه C1 نسبت به نمونه‌های دیگر رنگش متفاوت و خاکستری است. می‌توان گفت در ساخت این خشت مقداری خاکستر به خاک اضافه شده و رنگ خاکستری خشت به دلیل وجود خاکستر در آن است. «خاکستر چربی ناچیزی دارد که در خشت باعث عدم مکش آب شده و از ترک‌خوردگی آن جلوگیری می‌کند»<sup>۳۶</sup>. فرم نمونه C2 نیز نسبت به نمونه‌های دیگر فرسایش بیشتری یافته و بافت متلاشی‌شده و ترک‌خورده‌ای دارد به گونه‌ای که برای آزمایش‌های مقاومت مکانیکی این خشت بازسازی<sup>۳۷</sup> شده است.







شماره نمونه	C1	C2	C3	C4	میانگین
چگالی	۲,۶۹	۲,۵۶	۲,۴۱	۲,۷۵	۲,۶۰

#### ۴.۱.۲. وزن مخصوص (دانسیته)

وزن مخصوص نمونه‌های خشتی مطابق با استانداردهای ASTM C128 و ISIRI 4980 به دست آمده و نتایج آن در «جدول ۶» قابل مشاهده است. همان طور که مشخص است در نمونه‌های آزمایشی، خشت نوسنگی (C1) با عدد ۱,۶۹ گرم بر سانتی متر مکعب پایین ترین و خشت سلجوقی (C3) با عدد ۱,۹۷ گرم بر سانتی متر مکعب، بالاترین میزان دانسیته را دارند.

«ت ۴» نمایانگر نمودار بررسی دانسیته یا وزن مخصوص نمونه‌های آزمایشی است. دانسیته این نمونه‌ها از ۱,۶۹ تا ۱,۹۷ گرم بر سانتی متر مکعب است و دو خشت دوره‌های سلجوقیان

شماره نمونه	C1	C2	C3	C4	میانگین
وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	۱,۶۹	۱,۸۸	۱,۹۷	۱,۷۸	۱,۸۳

مشخصات	C1	C2	C3	C4
ابعاد (cm)	۴۷×۳۷×۱۰	۳۸×۳۸×۸	۱۸×۲۰×۷ - خرده	۲۰×۲۱×۶
بافت	همگن و یکدست	همگن و یکدست	همگن و یکدست	ناهمگن همراه با خرده آجر، سنگ و نخاله
رنگ	خاکستری	قهوه‌ای	قهوه‌ای روشن	قهوه‌ای تیره
فرم	فرسایش یافته با فرم مشخص	فرسایش یافته با بافت متلاشی شده و ترک خورده	فرسایش یافته با ترک خوردگی	فرسایش یافته با فرم مشخص
عملکرد	برپاسازی کالبد بنا در قالب جرز	برپاسازی کالبد بنا در قالب جرز	برپاسازی کالبد بنا در قالب جرز	برپاسازی کالبد بنا در قالب جرز
تصویر خشت				

## ۴. یافته‌ها، تجزیه و تحلیل

در این بخش مشخصات فنی نمونه‌ها شامل مشخصات فیزیکی و مکانیکی شرح داده می‌شود. مشخصات فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، وزن مخصوص، درصد رطوبت، جذب آب، دانه بندی و هیدرومتری، و حدود اتربرگ است. مشخصات مکانیکی در این پروژه نیز شامل مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌هاست. علاوه بر این ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها به روش XRD عرضه شده است.

### ۴.۱. آزمایش پایه

#### ۴.۱.۱. چگالی

مطابق استاندارد ASTM D854-14، چگالی نمونه‌های خشتی این پروژه به دست آمده و داده‌های آنها در «جدول ۵» مشاهده می‌شود. همان طور که پیش تر ذکر شد، عمده خاک‌ها چگالی بین ۲,۴ تا ۲,۹ دارند که چگالی نمونه‌های آزمایش شده در این محدوده قرار دارند.

۳۴. محسن طبعی. «ارایه ترکیب بهینه برای استحکام بخشی خشت‌های مصرفی در مرمت بناهای تاریخی کوه خواجه سیستان». هنرهای زیبا، ش. ۲۳۰ (پاییز ۱۳۸۴).

۳۵. کامبیز بهنیا و نگین اعرابی، مکانیک خاک (تهران: نگارنده دانش، ۱۳۹۱).

۳۶. باقر حسینی و زهرا سیدین خراسانی، آجر در معماری، زیبایی‌ها و کاربری‌ها (تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۵).

#### 37. XRD: X- ray diffraction

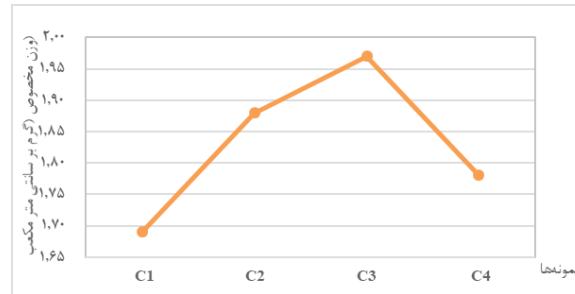
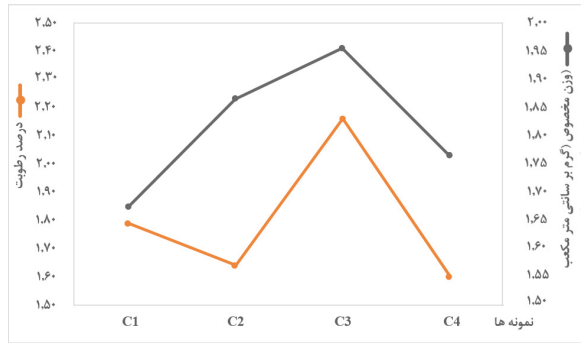
۳۸. فرهاد گلستانی فرد و دیگران، روش‌های شناسایی و آنالیز مواد (تهران: دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۳).

۳۹. لیلا سهیلی وند و همکاران، «بررسی توسعه پایدار با مصالح بوم‌آورد خشت و ملات در معماری کویری ایران».

جدول ۴ (پایین). مشخصات ظاهری نمونه‌های خشتی، عکس‌ها: فاطمه پارچه‌باف مطلق، تدوین: نگارندگان.

جدول ۵ (بالا). چگالی نمونه‌های خشتی پروژه، تدوین: نگارندگان.

جدول ۶ (میان). وزن مخصوص یا دانسیته نمونه‌های خشتی پروژه، تدوین: نگارندگان.



در «ت ۵» نمودار درصد رطوبت خشت‌ها به ترتیب دوره زمانی به همراه نمودار وزن مخصوص آنها نشان داده شده است. مطابق با این تصویر، درصد رطوبت نمونه‌ها، در بازه ۱،۶۰ تا ۲،۱۶ است و میزان درصد رطوبت نمونه‌ها با افزایش یا کاهش سن، تغییر معناداری ندارد؛ اما با در نظر نگرفتن نمونه دوره سلجوقی (C3)، می‌توان گفت با گذشت زمان میزان رطوبت موجود در نمونه‌ها کاهش یافته است. علاوه بر این، با مقایسه دو نمودار وزن مخصوص و درصد رطوبت نمونه‌ها، می‌توان گفت با در نظر نگرفتن دوره سلجوقیان (C3)، این دو پارامتر با هم رابطه معکوس دارند؛ این یعنی هرچه تراکم خشت بیشتر می‌شود، خلل و فرج کمتر و میزان رطوبت موجود در خشت کم می‌شود. اما با توجه به نمودارها، خشت C3 بالاترین میزان وزن مخصوص و درصد رطوبت را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. در صورتی که با توجه به رابطه معکوس این دو پارامتر، انتظار می‌رود پایین‌ترین میزان درصد رطوبت به این خشت تعلق داشته باشد. با توجه به این نکات، می‌توان گفت امکان دارد شرایط دیگری نیز در مقدار درصد رطوبت تاثیرگذار باشد. در واقع بالا بودن میزان درصد رطوبت نمونه به محل نمونه و شرایط نگهداری آن بسیار مرتبط است و نمونه C3 در حصار خشتی مجاور پارک ملافتح‌الله و حوض آب بسیار بزرگی قرار دارد و به نظر می‌رسد درصد رطوبت بالای این نمونه به همین دلیل باشد.

و صفاریان تراکم بیشتری نسبت به خشت‌های دیگر دارند که به نحوه ساخت و عمل‌آوری آنها و میزان تراکم گل توسط فرد خشت‌مال بستگی دارد و می‌توان انتظار داشت مقاومت بیشتری نسبت به سایر خشت‌ها داشته باشد. علاوه بر این بدون در نظر گرفتن نمونه دوره قاجار (C4)، می‌توان نتیجه گرفت روند این نمودار صعودی است و به مرور زمان، وزن حجمی یعنی تراکم خشت‌ها بیشتر شده است.

#### ۳.۱.۴. درصد رطوبت

در «جدول ۷» داده‌های آزمایشگاهی و درصد رطوبت نمونه‌های خشتی درج شده است. این داده‌های آزمایشگاهی مطابق با استانداردهای ASTM D2216 و ISIRI 7883 حاصل شده‌اند. مطابق با این جدول در نمونه‌های بررسی شده، کمترین درصد رطوبت متعلق به نمونه دوره قاجار (C4) و بیشترین مقدار متعلق به نمونه دوره سلجوقیان (C3) است. لازم به ذکر است میزان رطوبت نمونه به شرایط جوی محل و زمان برداشت آن وابستگی زیادی دارد.

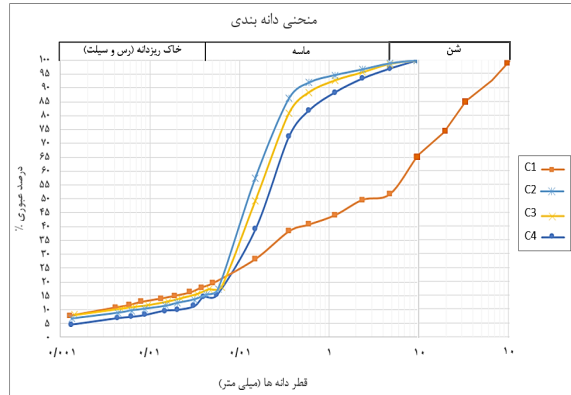
شماره نمونه	C4	C3	C2	C1
درصد رطوبت (W)	۱،۶	۲،۲	۱،۶	۱،۸
میانگین	۱،۸			

۴۰. بازسازی شده (با توجه به تدری و ضعیف بودن، این نمونه با دانسیته و رطوبت بهینه مشابه با نمونه اصلی بازسازی شده است).

ت ۴ (بالا، راست). نمودار بررسی وزن مخصوص نمونه‌های خشتی به ترتیب دوره زمانی، تدوین: نگارندگان.

جدول ۷ (پایین). درصد رطوبت نمونه‌های خشتی پروژه، تدوین: نگارندگان.

ت ۵ (بالا، چپ). مقایسه دو نمودار درصد رطوبت و وزن مخصوص نمونه‌های خشتی به ترتیب دوره زمانی، تدوین: نگارندگان.



اجزای این خاکها اندازه‌های متفاوتی دارند و دانه‌های آنها بهتر در یکدیگر چفت می‌شوند و به‌طور معمول مقاومت و ظرفیت باربری بیشتری دارند؛ در این نوع خاکها نفوذپذیری کمتر است. علاوه بر این، روند نمودار در نمونه C1 نسبت به نمودارهای دیگر متفاوت است و این نشان می‌دهد که درصد شن در این خاک بیشتر از نمونه‌های دیگر است و به بیان دیگر، این نمونه درشت‌دانه با مقادیر کمتر رس و سیلت هست.

#### ۵.۱.۴. حدود اتربرگ

آزمایش حدود اتربرگ برای نمونه‌های آزمایشی با توجه به استانداردهای ASTM D4318 و ISIRI 10731 انجام شده است. داده‌های به‌دست‌آمده از این آزمایش شامل حد روانی، حد خمیری، و نشانه خمیری است که در «جدول ۹» مشاهده می‌شود.

شماره نمونه	حد روانی LL	حد خمیری PL	نشانه خمیری LL-PL=PI	درشت‌دانه		
				رس و سیلت عبوری از #۲۰۰	ریز #۵۰	متوسط #۳۰
C1	۳۰٫۸	۲۰٫۵	۱۰٫۳	۴٫۵۳٪	۲۶٫۲۵٪	۸٫۸۹٪
C2	۲۲٫۸	۱۸٫۹	۳٫۹	۸٫۰۷٪	۸۳٫۹۵٪	۴٫۶۹٪
C3	۲۴٫۰	۲۰٫۲	۳٫۹	۴٫۱۵٪	۸۴٫۴۲٪	۷٫۱۳٪
C4	۲۲٫۷	۲۲٫۵	۰٫۲	۵٫۳۶٪	۷۶٫۷۰٪	۱۱٫۳۹٪

جدول ۸ (پایین، راست). درصد دانه‌بندی خاک‌های آزمایشی پروژه، تدوین: نگارندگان.

ت ۶ (بالا). منحنی دانه‌بندی و هیدرومتری خاک‌های آزمایشی، ترسیم: نگارندگان.

جدول ۹ (پایین، چپ). حدود اتربرگ و خاصیت خمیری خاک‌های آزمایشی پروژه، تدوین: نگارندگان.

#### ۴.۱.۴. دانه‌بندی و هیدرومتری

آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D422 روی نمونه‌ها انجام شده است. در «جدول ۸» دانه‌بندی خاک طبق سیستم طبقه‌بندی متحد تقسیم‌بندی شده و میزان شن، ماسه، و بخش ریزدانه نمونه‌ها نشان داده شده است. مطابق این جدول درصد بیشتر خاک نمونه‌ها ماسه و در اکثر نمونه‌ها درصد شن بسیار کم است. بخش ریزدانه خاک در نمونه‌ها نیز درصد کمی است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های بررسی شده دارای ماسه ریز بیشتری هستند (با رنگ تیره نشان داده شده‌اند).

به‌طور کلی نتیجه آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری خاک به‌صورت منحنی روی نمودار «ت ۶» مشاهده می‌شود. در این منحنی دانه‌بندی و هیدرومتری چهار نمونه خاک بررسی شده است. محور افقی نمودار نشان‌دهنده قطر دانه‌ها و محور عمودی آن درصد وزنی آن بخش از نمونه خاک است که از اندازه معینی کوچک‌تر است. شکل منحنی نمودار دانه‌بندی خاک بیانگر دانه‌بندی مناسب یا نامناسب خاک است. اگر منحنی تنها در بخش کوچکی از محور افقی قرار گیرد، این خاک یکنواخت است و دانه‌بندی نامناسبی دارد. اما اگر منحنی به‌صورت کشیده و افقی باشد، دانه‌بندی خاک مناسب است و غیریکنواخت نامیده می‌شود. هر چهار منحنی «ت ۶» بیانگر تنوع دانه‌بندی نمونه‌ها و غیریکنواخت بودن آنهاست.

شماره نمونه	درشت‌دانه			رس و سیلت عبوری از #۲۰۰
	شن #۴	ماسه درشت #۱۰	متوسط #۳۰	
C1	۳۴٫۸۴٪	۱۵٫۴۶٪	۸٫۸۹٪	۴٫۵۳٪
C2	۱۰٫۰۶٪	۲٫۱۹٪	۴٫۶۹٪	۸۳٫۹۵٪
C3	۱۳٫۲۹٪	۲٫۹۸٪	۷٫۱۳٪	۸۴٫۴۲٪
C4	۲٫۹۷٪	۲٫۵۵٪	۱۱٫۳۹٪	۷۶٫۷۰٪

آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی است، در ادامه فرایند انجام هر آزمایش و نتایج به‌دست‌آمده از آن تحلیل و در گذر زمان بررسی شده است.

#### ۱.۲.۴. مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در این پروژه مطابق با استاندارد ASTM C109-90 انجام شده و برای انجام تست مقاومت فشاری از دستگاه جک ملات‌شکن اتوماتیک ایتالیایی با ظرفیت ۳۰ کیلو نیوتن (Controls- Model 65) استفاده شده است. طبق استاندارد ذکر شده، ابتدا نمونه‌های خشتی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر برش داده می‌شود و در ادامه نمونه مکعبی، که دارای سطوح صاف و هموار است، داخل دستگاه قرار می‌گیرد تا نیرو توسط جک ملات‌شکن بر نمونه‌های خشتی اعمال شود. حداکثر سرعت بارگذاری بر نمونه‌ها در این دستگاه برابر ۰/۱ مگاپاسکال بر ثانیه انتخاب شد تا نیرو به‌صورت یکنواخت روی نمونه‌ها اعمال شود و بارگذاری تا لحظه شکست ادامه یابد. در «ت ۸» و «ت ۹» به ترتیب دستگاه مذکور و نحوه قرارگیری نمونه در فک‌های دستگاه مشاهده می‌شود.

در «جدول ۱۰» مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش‌شده مشاهده می‌شود. با توجه به این جدول، مقاومت فشاری نمونه



شیوه مطلوب و مناسب مطالعه و تحلیل خواص خمیری خاک‌ها، بررسی هم‌زمان حد روانی و نشانه خمیری خاک است. این کار با استفاده از «مختصات خمیری» مطابق با «ت ۸» انجام می‌شود. این مختصات طبق نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از بررسی و تحلیل تعداد زیادی نمونه‌های خاک حاصل شده است. در این نمودار رس‌ها با استفاده از خطی به نام A از لای‌ها جدا شده‌اند و معادله این خط برابر با

$$PI = 0.73(LL - 20)$$

است. در این معادله PI نشانه خمیری و LL حد روانی خاک است. مختصات خمیری خاک‌ها بسیار اهمیت دارد و در دسته‌بندی و رده‌بندی خاک‌ها استفاده می‌شود.<sup>۴۱</sup> مطابق «ت ۷» دسته‌بندی خاک‌ها مشخص شده و نمونه‌های این پروژه نیز در این نمودار نشان داده شده‌اند. بنابراین نمونه C1 خاک رس با مقدار خمیری متوسط و نمونه‌های C2 و C3 رس و سیلت با خاصیت خمیری کم و نمونه C4 فاقد خاصیت خمیری است.

#### ۲.۴. آزمایش مکانیکی

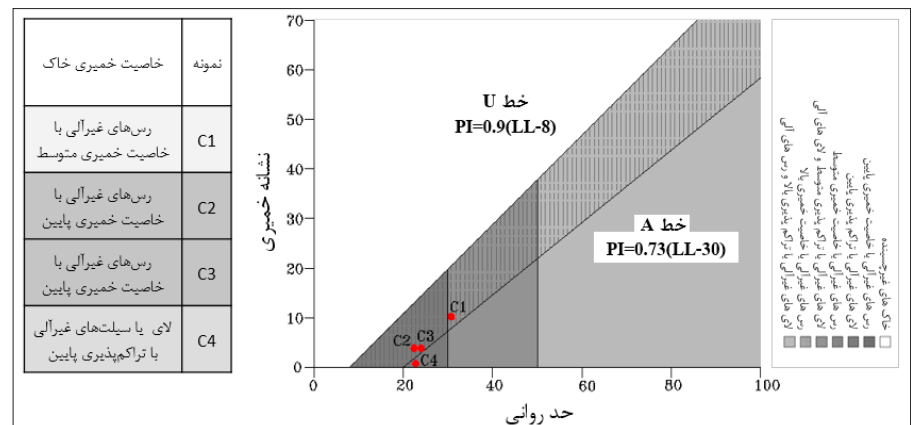
در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت مکانیکی شامل

۴۱. امیرمحمد طباطبایی، روسازی راه تهران: مرکز نشر دانشگاهی، (۱۳۸۹).

ت ۷ (پایین، راست). نمودار خاصیت خمیری خاک‌های آزمایشی، مأخذ: بهنیا، مکانیک خاک، ص ۳۴۱، بازرس: ف. پارچه‌باف.

ت ۸ (پایین، میان). دستگاه جک ملات‌شکن اتوماتیک ایتالیایی با ظرفیت ۳۰ کیلو نیوتن (Controls- Model 65)، عکس: ف. پارچه‌باف.

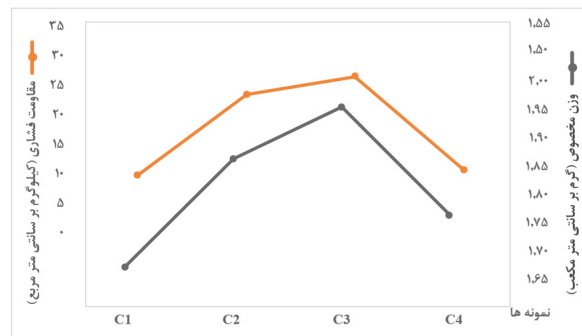
ت ۹ (پایین، چپ). قرارگیری نمونه فشاری در فک‌های دستگاه، عکس: ف. پارچه‌باف.



بهمرور زمان شیوه ساخت و تولید خشت‌ها بهتر شده و مقاومت فشاری آنها افزایش یافته است. کاهش مقاومت فشاری نمونه دوره قاجار می‌تواند به دلیل فقدان مهارت و کمی امکانات برای تراکم قالب خشت و همچنین ناهمگنی مصالح مورد استفاده باشد. همان‌طور که در بخش ۳ ذکر شد، داخل این خشت از سنگ و تکه‌های آجر و یا به عبارتی از مصالح بازیافتی و نخاله استفاده شده که این خود سبب کاهش مقاومت فشاری آن شده است. علاوه بر این با مقایسه دو نمودار مقاومت فشاری و وزن مخصوص خشت‌های آزمایشی می‌توان گفت روند دو نمودار نسبت به یکدیگر یکسان است و مقاومت فشاری و وزن مخصوص با هم رابطه مستقیم دارند و هرچه تراکم نمونه بیشتر باشد، نمونه در برابر فشار مقاوم‌تر است.

#### ۲.۲.۴. مقاومت خمشی

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C 293 انجام شده است. برای تست مقاومت خمشی از همان دستگاه قبلی یعنی دستگاه جک ملات‌شکن اتوماتیک ایتالیایی با ظرفیت ۳۰ کیلو نیوتن (65 Model-Controls)، با تعویض فک‌های آن، استفاده می‌شود. طبق استاندارد مذکور، ابتدا نمونه‌های خشتی به ابعاد ۱۶×۴×۴ برش داده می‌شود و داخل دستگاه قرار می‌گیرد تا نیرو توسط جک ملات‌شکن بر نمونه‌های آزمایشی اعمال شود.



جدول ۱۰ (بالا). مقاومت فشاری نمونه‌های خشتی پروژه، تدوین: نگارندگان.

ت ۱۰ (پایین، راست). مقایسه مقاومت فشاری خشت‌ها در منابع مختلف با مقاومت‌های فشاری به‌دست‌آمده در پروژه حاضر، تدوین: نگارندگان.

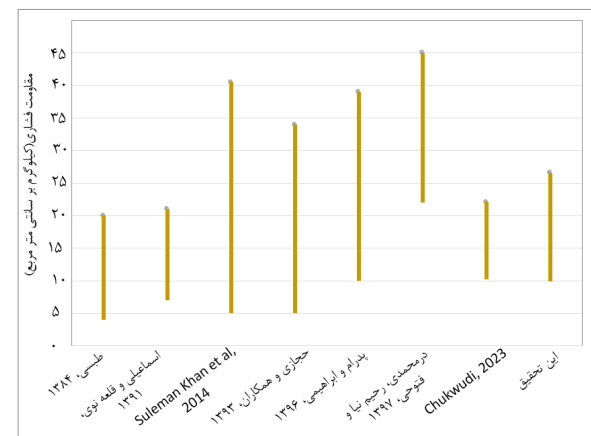
ت ۱۱ (پایین، چپ). مقایسه دو نمودار مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌های خشتی به‌ترتیب دوره زمانی، تدوین: نگارندگان.

شماره نمونه	C1	C2	C3	C4	میانگین
مقاومت فشاری (Kg/cm <sup>2</sup> )	۹,۸۹	۲۳,۵۵	۲۶,۶۱	۱۰,۸۰	۱۷,۷۱

خشتی دوره سلجوقیان (C3) بیشترین مقدار مقاومت فشاری نسبت به سایر نمونه‌ها و برابر با ۲۶,۶۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. مقاومت فشاری نمونه خشت دوره نوسنگی (C1) کمترین مقدار این مقاومت نسبت به سایر نمونه‌ها و برابر ۹,۸۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

«ت ۱۰» نمایانگر مقایسه مقاومت فشاری خشت در مقالات و پروژه‌های مختلف با مقاومت فشاری‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های این پروژه است. همان‌طور که مشخص است بازه اعداد به‌دست‌آمده در این پروژه، در بازه مقاومت فشاری خشت‌های پروژه‌های دیگر قرار دارد که می‌تواند نشان‌دهنده صحت نتایج به‌دست‌آمده باشد.

در «ت ۱۱» نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های خشتی به‌ترتیب دوره زمانی و نمودار وزن مخصوص آنها نشان داده شده است. با توجه به این تصویر، میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها با گذشت زمان کمتر یا بیشتر نمی‌شوند؛ البته با در نظر نگرفتن نمونه دوره قاجار (C4) می‌توان نتیجه گرفت که



ت ۱۲ (راست). قرارگیری نمونه‌های خمشی در فک‌های دستگاه، عکس: ف. پارچه‌باف.

جدول ۱۱ (میان، بالا). مقاومت خمشی نمونه‌های خشتی پروژه، تنظیم: نگارندگان.

ت ۱۳ (میان، پایین). مقایسه مقاومت خمشی خشت‌ها در منابع مختلف با مقاومت خمشی‌های به‌دست‌آمده در پروژه، تنظیم: ف. پارچه‌باف و امیرحسین صادقپور.

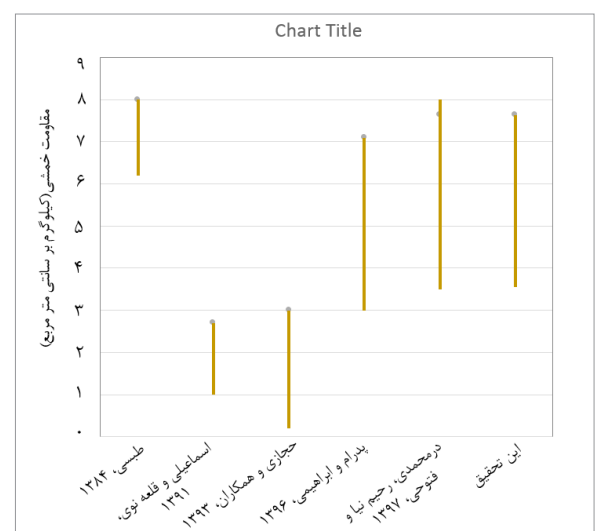
ت ۱۴ (چپ). مقایسه دو نمودار مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه‌های خشتی به‌ترتیب دوره زمانی، تدوین: نگارندگان.



حداکثر سرعت بارگذاری بر نمونه‌ها در این دستگاه برابر ۴۴ نیوتون بر ثانیه انتخاب شده تا نیرو به‌صورت یکنواخت روی نمونه‌ها اعمال شود و بارگذاری تا لحظه شکست ادامه یابد. «ت ۱۲» نحوه قرار گرفتن نمونه در فک‌های دستگاه را نشان می‌دهند.

در «جدول ۱۱» نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. مطابق با این جدول، در نمونه‌های خشتی به‌ترتیب خشت‌های دوره نوسنگی (C1) و سلجوقیان (C3) دارای کمترین و بیشترین میزان مقاومت خمشی هستند. در «ت ۱۳» نمایانگر مقایسه مقاومت خمشی خشت‌ها در مقالات و پروژه‌های مختلف و اعداد به‌دست‌آمده از آزمایش‌های خمشی این پروژه است. با توجه به تصویر، بازه اعداد به‌دست‌آمده مربوط به مقاومت خمشی نمونه‌های خشتی این پروژه در بازه مقاومت خمشی خشت‌های پروژه‌های دیگر

شماره نمونه	C1	C2	C3	C4	میانگین
مقاومت خمشی (Kg/cm <sup>2</sup> )	۳,۵۶	۶,۲۲	۷,۶۴	۳,۶۷	۵,۲۷



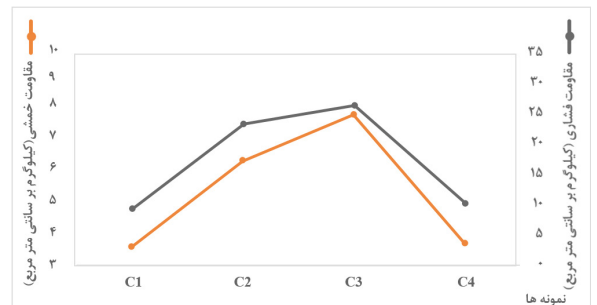
قرار دارد که نشان می‌دهد اعداد به‌دست‌آمده درست هستند. نمودار مقاومت خمشی خشت‌ها به‌ترتیب دوره زمانی و نمودار مقاومت فشاری آنها در «ت ۱۴» آمده است. با توجه به این نمودار، با در نظر نگرفتن دوره قاجار (C4)، با گذشت زمان مقاومت خمشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و می‌توان گفت پایین بودن میزان مقاومت خشت C4 مربوط به نحوه ساخت آن و استفاده از نخاله و مصالح بازیافتی است. با مقایسه دو نمودار مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز می‌توان اظهار کرد که این دو پارامتر با هم رابطه مستقیم دارند.

### ۳.۴. آزمایش شیمیایی (کانی‌شناسی به روش XRD)

در آزمایش کانی‌شناسی به روش XRD، در نمونه‌های خشتی ترکیبات و کانی‌هایی از قبیل کوارتز، کلسیت، و آلبیت شناسایی شد و به‌طور کلی فازهای غالب نمونه‌های خشتی کوارتز و کلسیت است. کوارتز نام ترکیب شیمیایی دی‌اکسید سیلیسیم است و می‌تواند ناشی از وجود سنگ‌دانه‌های شن و ماسه‌ای در نمونه‌ها باشد.

کوارتز باعث ایجاد پیوندی محکم در نمونه می‌شود و به عبارتی هرچه میزان کوارتز موجود در نمونه بیشتر باشد، خاک دارای مقاومت بیشتری خواهد بود.<sup>۴۲</sup>

در نمونه‌های خشتی آزمایش‌شده، میزان کوارتز موجود در آنها به‌طور تقریبی یکسان است. علاوه بر کوارتز، کانی دیگر





خشتی قابل مشاهده است. در این نمودارها، فازهای شاخص در بالای پیک (وج) نمودار به صورت اختصار نوشته شده و اسم کامل فاز کریستالین در این تصویر نیز آمده است. مطابق با این نمودارها در نمونه‌های C1 و C4، به علت فراوانی کوارتز و کلسیت، پیک نمودار مربوط به این دو کانی است و در نمونه‌های خشتی C2 و C3، مقدار سه کانی کوارتز، کلسیت، و آلبيت زياد است و در نمودار، این سه کانی مرتفع هستند.

نمونه	کانی
C1	فازهای اصلی: کوارتز، کلسیت فازهای فرعی: آلبيت
C2	فازهای اصلی: کوارتز، کلسیت، آلبيت
C3	فازهای اصلی: کوارتز، کلسیت، آلبيت
C4	فازهای اصلی: کوارتز، کلسیت فازهای فرعی: آلبيت

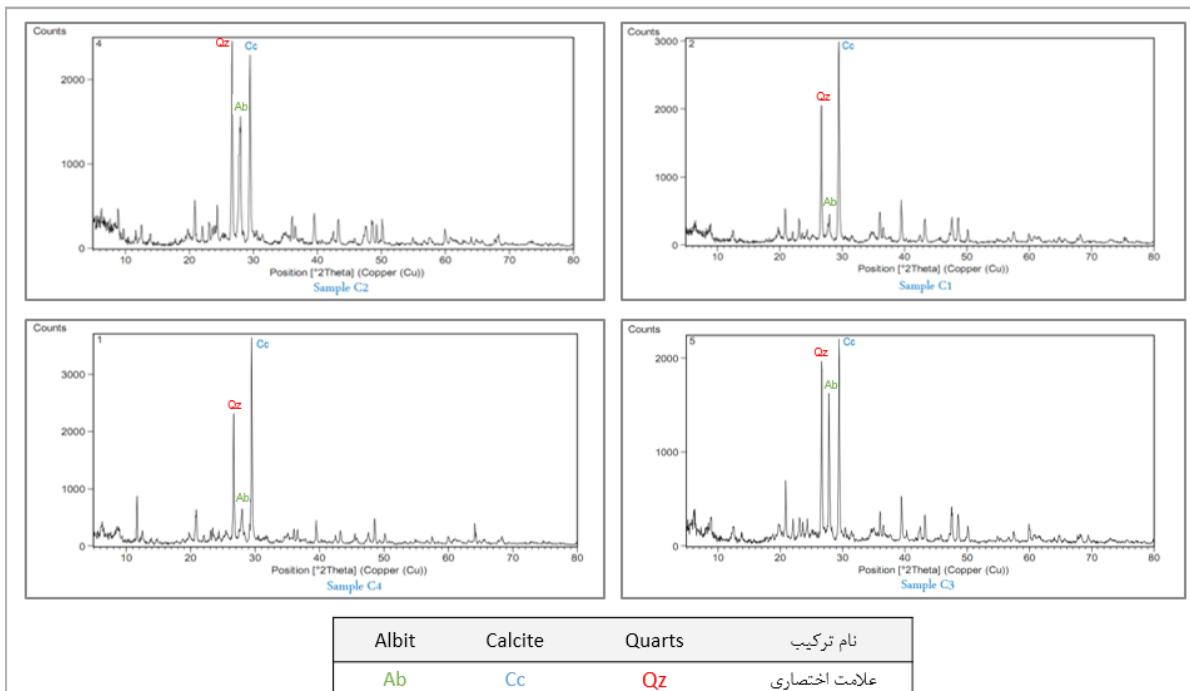
شناسایی شده در نمونه‌ها کلسیت یا کربنات کلسیم است. میزان کلسیت موجود در نمونه‌های خشتی آزمایش شده زیاد و از جمله فاز غالب آنهاست. علاوه بر کانی‌های ذکر شده، در نمونه‌های خشتی مقداری آلبيت نیز وجود دارد. «آلبيت به عنوان یک فاز اولیه در بافت خشت وجود دارد»<sup>۳۳</sup> و بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نمونه‌های با مقدار آلبيت بالاتر، مقاومت فشاری بیشتری دارند. در واقع با توجه به نمودارهای حاصل از آزمایش XRD، به ترتیب در نمونه‌ها، میزان آلبيت از بیشترین به کمترین در نمونه‌های C4، C2، C3 و C1 است و با توجه به نتایج مشابه مقاومت مکانیکی، به نظر می‌رسد میزان آلبيت در استحکام نمونه مؤثر است. در «جدول ۱۲» کانی‌های موجود در نمونه‌های خشتی مشاهده می‌شود.

در «ت ۱۵» نمودارهای آنالیز آزمایش XRD در نمونه‌های

۴۲. سایه رضازاده و همکاران، «مطالعه دگرسانی، ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک صنعتی یانیق با هدف بررسی کاربردهای صنعتی آن»، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۴، ش. ۱ (بهار ۱۳۹۳): ۴۹-۵۷.

جدول ۱۲ (بالا). نتایج کانی‌شناسی نمونه‌های خشتی با روش XRD، نتایج تحلیل: دکتر ابوالقاسم کاهانی، دانشیار دانشکده شیمی <https://faculty.kashanu.ac.ir/kahani/fa>

ت ۱۵ (پایین). نمودارهای آنالیز شیمیایی به روش XRD برای نمونه‌های خشتی (نتایج ارائه شده توسط آزمایشگاه XRD واقع در دانشگاه کاشان).



## ۵. جمع‌بندی

در «جدول ۱۳» نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده در این پروژه درج شده است. از جمله مشخصات فیزیکی مؤثر در مقاومت و کیفیت نمونه‌ها وزن مخصوص یا دانسیته است. در این آزمایش، نمونه C3 دارای بیشترین وزن مخصوص بوده و نمونه C2 نیز وزن مخصوص بالایی دارد. درحالی‌که دو نمونه C1 و C4 وزن مخصوص کمتری دارند و دارای تراکم حجمی کمتری هستند. بنابراین نمونه‌های C3 و C2 تراکم حجمی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. هرچه میزان درصد رطوبت نیز (میزان رطوبت موجود در نمونه) کمتر باشد، برای نمونه مناسب‌تر است؛ زیرا جذب آب توسط نمونه در فصول مختلف، سبب انقباض و انبساط نمونه می‌شود و ایجاد ترک می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، نمونه C2 دارای کمترین و نمونه C3 دارای بیشترین میزان درصد رطوبت است. با توجه به محل نمونه C3 که از حصار سلجوقی تهیه گردیده و در حال حاضر که فضای سبز و آب‌نما در مجاورت آن قرار دارد، رطوبت بیشتری در آن ایجاد شده است.

در آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری نیز همه نمونه‌ها دارای خاک مناسب و غیریکنواخت هستند و میزان ماسه در نمونه‌های C3 و C2 نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است. در نمونه C1 نیز درصد شن نسبت به نمونه‌های دیگر بسیار بیشتر است و با توجه به نامناسب بودن وجود شن زیاد در خشت، می‌توان گفت دانه‌بندی این نمونه از سایر نمونه‌ها نامناسب‌تر است. همچنین در آزمایش حدود اتربرگ نیز نمونه C1 دارای رس غیرآلی با خاصیت خمیری متوسط و نمونه‌های C2 و C3 دارای رس غیرآلی با خاصیت خمیری پایین هستند، درحالی‌که نمونه C4 دارای لای یا سیلت غیرآلی با تراکم‌پذیری پایین است و برای تهیه خشت بهتر است از خاک رس استفاده شود؛ زیرا چسبندگی بیشتری دارد و دانه‌های خاک در کنار یکدیگر بهتر قرار می‌گیرند. بنابراین نوع خاک نمونه C4 برای ساخت خشت چندان مناسب نیست. علاوه‌براین در ساخت این نمونه، از مصالح بازیافتی و نخاله استفاده شده که تأثیر زیادی در کیفیت مصالح سازنده و مقاومت آن دارد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی روی

۴۳. محمدمین امامی و همکاران، «روش‌های باستان‌سنجی به‌منظور ساختارشناسی آجرهای کشف‌شده از تل آجری تخت جمشید»، مطالعات باستان‌شناسی، ش. ۲۰ (پاییز ۱۳۹۳): ۱-۱۸.

جدول ۱۳. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌های خشتی بناهای تاریخی کاشان، تدوین: نگارندگان.

مشخصات شیمیایی	مشخصات مکانیکی (Kg/cm <sup>2</sup> )		حدود اتربرگ (نوع خاک)	مشخصات فیزیکی (پایه)			نمونه آزمایشی
	مقاومت فشاری	مقاومت خمشی		رطوبت %	دانه‌بندی و هیدرومتری		
					رس و لای %	ماسه %	
آنالیز شیمیایی به روش XRD							
کوارتز، کلسیت و آلپیت	۳،۵۶	۹،۸۹	رس غیر آلی با خاصیت خمیری متوسط	۴،۵۳	۶۰،۶۰	۳۴،۸۴	C1
کوارتز، کلسیت و آلپیت	۶،۲۲	۲۳،۵۵	رس غیر آلی با خاصیت خمیری پایین	۸،۰۷	۹۰،۸۳	۱،۰۶	C2
کوارتز، کلسیت و آلپیت	۷،۶۴	۲۶،۶۱	رس غیر آلی با خاصیت خمیری پایین	۴،۱۵	۹۴،۵۳	۱،۲۹	C3
کوارتز، کلسیت و آلپیت	۳،۶۷	۱۰،۸۰	لای غیرآلی با تراکم‌پذیری پایین	۵،۳۶	۹۱،۶۴	۲،۹۷	C4
-	۵،۲۷	۱۷،۷۱	-	۵،۵۲	۸۴،۴۰	۱۰،۰۴	میانگین

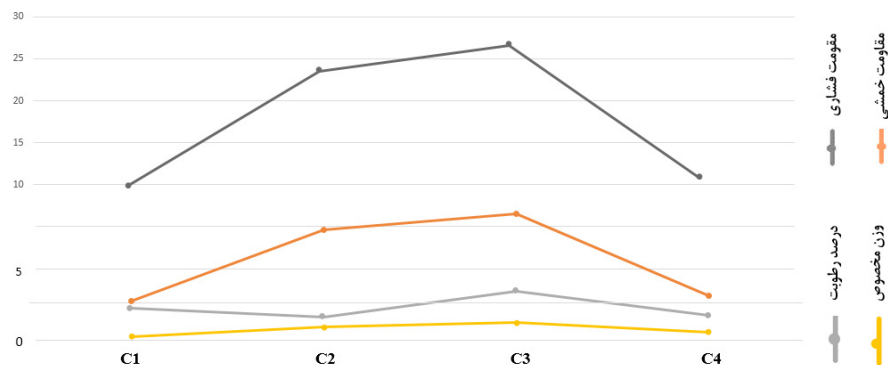
تصویر، با گذشت زمان، بدون در نظر گرفتن نمونه C4، می‌توان نتیجه گرفت که میزان مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، و وزن مخصوص افزایش یافته است و احتمال داده می‌شود با گذشت زمان، مهارت افراد در انتخاب خاک مناسب، عمل‌آوری خشت، و نحوه تراکم و ساخت خشت بیشتر شده است. البته می‌توان گفت قدمت نمونه‌ها نیز در نتیجه آزمون‌ها بسیار مؤثر است و فرسایش نمونه‌ها در شرایط مختلف، امکان کاهش خواص فیزیکی و مقاومت مکانیکی نمونه‌ها را فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که در ساخت خشت C4، ویژگی‌های پایه و خواص مکانیکی این خشت در مقایسه با سایر دوره‌های تاریخی، به شدت تحت تأثیر استفاده از خاک نامناسب و استفاده از مصالح بازیافتی در ساخت آن قرار گرفته است.

### نتیجه‌گیری

در این پروژه، مشخصات فیزیکی، مکانیکی، و شیمیایی نمونه‌های خشتی بناهای تاریخی کاشان در ۴ دوره تاریخی تحلیل و بررسی شد و مشخص گردید که دانه‌بندی و نوع خاک در مشخصات فیزیکی و مقاومت خشت‌ها مؤثر است. علاوه‌براین، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، و خمشی نمونه‌ها با هم رابطه مستقیم دارند و این پارامترها با درصد

نمونه‌های خشتی نسبتاً مشابه است. نمونه C3 دارای بیشترین میزان مقاومت فشاری و خمشی است و پس از آن نمونه C2 مقاومت بالایی دارد. کمترین میزان مقاومت مکانیکی را نیز نمونه C1 دارد. مقاومت مکانیکی نمونه C4 نیز پایین است و دلیل آن، استفاده از مصالح بازیافتی و خاک نامرغوب در ساخت آن بوده است. با توجه به این موضوع، می‌توان گفت خاک در مشخصات فیزیکی و مکانیکی خشت اثر مستقیم دارد. در واقع در نمونه‌های C3 و C2 توزیع دانه‌بندی مناسب‌تر است و درصد ماسه بالاتری دارند و این موضوع باعث ایجاد بافت یکنواخت و متراکم و اتصال قوی‌تری بین دانه‌ها شده است و نمونه‌های C1 و C4 دارای دانه‌بندی غیرگسترده هستند و این باعث جلوگیری از ایجاد بافت یکنواخت و تراکم‌پذیری کمتر توده خشت شده است؛ یعنی دانه‌بندی و جنس خاک اثر مستقیم بر ساختار و مقاومت خشت ساخته‌شده از آن دارد. علاوه‌براین وزن مخصوص (دانسیته) و درصد رطوبت نیز با ساختار مکانیکی خشت رابطه دارند. با توجه به بررسی نمونه‌های خشتی، به‌طور کلی با افزایش وزن مخصوص و کاهش درصد رطوبت، خواص مکانیکی خشت شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بیشتر می‌شوند؛ یعنی هرچه وزن مخصوص خشت بیشتر شود، تراکم و فشردگی آن بیشتر و خلل و فرج در آن کم می‌شود و در ادامه میزان درصد رطوبت آن کاهش می‌یابد و با این تفاسیر ساختار خشت محکم‌تر و نسبت به تنش‌های فشاری و خمشی مقاوم‌تر می‌شود و میزان مقاومت فشاری و خمشی آن افزایش می‌یابد. علاوه‌براین بر اساس نتایج آزمایش شیمیایی نیز می‌توان گفت در همه نمونه‌ها، فازهای کوارتز، کلسیت، و آلپیت وجود دارد و هرچه میزان آلپیت در نمونه‌ها بیشتر باشد، میزان مقاومت مکانیکی نیز افزایش یافته است. «ت ۱۶» نمایشگر مقایسه نمودارهای به‌دست‌آمده نمونه‌های خشتی به ترتیب دوره زمانی است. مطابق با این

ت ۱۶. مقایسه نمودارهای به‌دست‌آمده نمونه‌های خشتی به ترتیب دوره زمانی.



و وجود بیشتر ترکیب آلیت سبب مقاومت نمونه‌ها شده است. با گذشت زمان نیز می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های خشتی نسبت به قبل مقاوم‌تر شده‌اند و کیفیت بهتری دارند و مهارت افراد در انتخاب خاک مناسب، عمل‌آوری خشت، و نحوه تراکم و ساختار خشت بیشتر شده است.

رطوبت رابطه معکوس دارند. درواقع با افزایش وزن مخصوص و تراکم حجمی نمونه‌ها، خلل و فرج داخل آنها و نیز درصد رطوبت موجود در آنها کاهش می‌یابد. به‌علاوه افزایش تراکم نمونه سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی آن می‌شود. ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها نیز کوارتز، کلسیت، و آلیت است

## References

- Amiri, M., AR. Kalantari, and H. Mehri. *Knowledge of Building Materials*. Tehran: Ainde Danesh. 2015. (In Persian)
- ASTM C128. "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate". in *ASTM International*, West Conshohocken, 2023.
- ASTM D 422. "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils". in *ASTM International*, West Conshohocken, 2007.
- ASTM D 854-14. "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer". in *ASTM International*, West Conshohocken, 2023.
- ASTM D 2216. "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass". in *ASTM International*, West Conshohocken, 2019.
- ASTM D 4318. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". In *ASTM International*, West Conshohocken, 2018.
- ASTM F3419-22. "Standard Test Method for Mineral characterization of Equine Surface Materials by X-Ray Diffraction (XRD) Techniques". in *ASTM International*, West Conshohocken, 2022.
- Avrami, Erica, Hubert Guillaud, and Mary Hardy. *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. Conservation of Earthen Archaeological Sites, 2008.
- Behnia, K. and N. Arabi. *Soil Mechanics*. Tehran: Nagrande Danesh, 2013. (In Persian)
- Dormohammadi, M., R. Rahimnia, and M. Fotuhi Ardakani. "Laboratory Investigation of the Role of Mechanical Stabilization in Improving the Compressive, Tensile and Bending Strength of Slay". *Housing and Village Environment*. no. 168 (Winter 2018): 61-76. (In Persian)
- Emami, MA., S. AryaNasab, H. Ahmadi, A. Asgari Chavardi, and P.F. Caliri. "Archaeometric Methods for the Structural Analysis of Bricks Discovered from the Brick Hill of Persepolis". *Archaeological Studies*, no. 2 (Autumn 2013): 1-18. (In Persian)
- GolestaniFard, F., MA. Bahrevar, and I. Salahi. *Materials Identification and Analysis Methods*. Tehran: University of Science and Technology, 2004. (In Persian)
- Hadian Dehkordi, M. "Studies of Soil Science of Historical and Ancient Clay Materials in Different Regions of Iran". *The Scientific Quarterly of the Work*. no. 75 (Winter 2016): 85-96. (In Persian)
- Harris, Cyril M. *Descriptive Culture of Architecture and Building*. Persian Translated by MR. Afzali and Mehrdad Hashemzadeh. Tehran: Daneshyar Publications, 2002. (In Persian)
- Hejazi, M., M. Hashemi, E. Jamalnia, and M. Batavani. "The Effect of Additives on the Mechanical Resistance of Clay Made from Isfahan Soil". *Housing and Village Environment*. no. 151 (Autumn 2013): 67-80. (In Persian)
- Hejazi, S.A.M., B. Hejazi, H. Mehdad, and Saba Hejazi. "Study of Earthquake Destruction of an Adobe Cell in Bam Citadel and Presentation of Its Restoration Plan". *Restoration and Architecture of Iran*. vol. 9 (2014): 71-87. (In Persian)
- Hosseini, B. and Z. Seydain Khorasani. *Bricks in Architecture, Beauty and Functionality*. Tehran: Shahid Rajaei Tarbiat-e Dabir University, 2015. (In Persian)
- ISIRI 4980. *Determination of Density, Relative Density (specific gravity) and Water Absorption of Fine Aggregate*. National Standard Organization of Iran, 2016. (In Persian)
- ISIRI 7883. *Determination of Soil Moisture Percentage*. National Standard Organization of Iran. 2005. (In Persian)
- ISIRI 10731. *Determining the Limits of Etterberg Soil*. National Standard Organization of Iran. 2016. (In Persian)
- Ismaili, A. and M. Ghalehnovi. "The Effect of Palm Fibers and Lime as a Natural Stabilizer, on the Mechanical Characteristics of Clay (in environmental conditions with 35% moisture)". *Housing and Village Environment*, no. 138 (2012): 53-62.
- Kouakou, Conand Honoré and Jean-Claude Morel. "Strengths and Elasto-plastic Properties of Non-industrial Building Materials Manufactured with Clay as a Natural Binder". *Applied Clay Science*, vol. 44, no. 1 (2009): 27-34.
- Maserrat, H. *From Soil to Clay (clay from the perspective of*

*architecture and anthropology*). Tehran: Yazda, 2014. (In Persian)

Ministry of Roads and Urban Development, Deputy of Housing and Construction. *National Building Regulations, Topic 8*. Tehran: Development of Iran, 2009. (In Persian)

Minke, Gernot. *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Berlin, Boston: Birkhäuser – Publishers for Architecture Basel, 2006.

NZS 4297: Engineering design of earth buildings. (1998). Standards New Zealand: Wellington.

Pedram, B. and A. Ebrahimi. "Investigation of the Physical and Structural Properties of the Clays Used in the World Heritage Area of Bam Citadel". *Archeology Research Quarterly*, no. 2 (Autumn 2016): 81-102. (In Persian)

Rahimnia, R., A. Mahmoudzadeh, F. Tehrani, and A. Zamanifard. "Recognition of Native Architectural Experiences in South Khorasan, for the Protection and Restoration of Adobe Architecture". *Housing and Village Environment*, no. 142 (Summer 2011): 19-32. (In Persian)

Rahimnia, R. and D. Heydari. "Effect of PI Soil's Pasty Range on Tensile and Compressive Strength of Clays Fixed with Cement for Use in the Protection of Clay Structures". *Restoration, Works and Historical-cultural Textures*, vol. 2 (Winter 2019): 91-102. (In Persian)

Rahimi, H. *Building Materials*. Tehran: University of Tehran, 2006. (In Persian)

Rezazadeh, S., MR. Hosseinzadeh, and M. Moayed. "Study

of Alteration, Mineralogical Composition and Physical and Chemical Properties of Industrial Soil of Yanig with the Aim of Investigating Its Industrial Applications". *Journal of Advanced Applied Geology*, vol. 4, no. 1 (Spring 2013): 49-57. (In Persian)

Sarmad Nahri, A. and M. Kardan. *Complete Reference for Knowledge of Building Materials*. Tehran: Motafakeran, 2009. (In Persian)

SoheiliVand, L., V. HejirKarzar, and B. Samadian. "Investigation of Sustainable Development with Organic Materials of Clay and Mortar in the Desert Architecture of Iran". in *The Proceedings of the National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, Fars, Estahban, 2009*. (In Persian)

Tabasi, M. "Presentation of the Optimal Composition for the Strengthening of Used Clays in the Restoration of the Historical Monuments of Khajeh Mountain in Sistan". *Honarhaye Ziba*, no. 23 (Autumn 2014): 53-58. (In Persian)

Tabatabaei, AM. *Road Paving*. Tehran: University Publishing Center, 2010. (In Persian)

Walker, Peter. *The Australian Earth Building Handbook, HB 195-2002*. Sydney: Standards Australia, 2002.

Zargarzadeh Dezfuli, M., SK. Lari Baghaal, Najme Salarinasab, and M. BabaeiMorad. "KhvonChini, Evolution and Proportion of Brick Dimensions in Facades of Dezful Architectural Works". *Iranian Architectural Studies*, no. 9 (Spring and Summer 2015): 47-64. (In Persian)

Zemorshidi, Hossein. *Iranian Architecture: Traditional Material Science*. Tehran: Zommorod, 2002. (In Persian)

This page is intentionally rendered without text.

این صفحه آگاهانه بدون متن ارائه شده است.