Journal of Research on Archaeometry 2024; 10 (1); 145-165

Journal of Reserarch on Archaeometry

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.1.414

Original Paper Open Access

Analysis of the Effect of Soil Properties on the Mechanical Resistance of Historical Mud-Bricks of Yazd

Bardia Hajirasouliha*[1], Gholamreza Kiani Dehkiani[2], Dariush Heydari Beni[3], Mohammadamin Emami[4]

1. Master's student, Restoration and Conservation Faculty, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assistant Professor, Restoration and Conservation Faculty, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
3. Assistant Professor, Restoration and Conservation Faculty, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
4. Professor, Restoration and Conservation Faculty, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran

Received: 2024/04/25 Accepted: 2024/06/16

Abstract

Mud-brick, as one of the oldest man-made works, has been the main material of many historical buildings in Iran since the distant millennia until now. Studying the characteristics of historical mud-brick is considered important and necessary both for documenting and recording information, which is one of the first measures to protect cultural remains, and for creating a standard for comparing modern adobe. The need to protect and restore mud-brick structures doubles the need to investigate and recognize these historical materials and measure their behavioral characteristics. As any kind of intervention in historical buildings requires a relative knowledge of its constituent materials. This research aims to analyze the factors affecting the mechanical resistance of historical mud-bricks of Yazd region by examining the structure of the soil and tries to find an answer to this question in the form of inductive reasoning based on a combination of field, experimental, and laboratory methods, What is the relationship between the mechanical resistance and the characteristics of the soil forming the historical mud-brick of Yazd region? And the diversity of the soil of each region has created what features in the structure of historical mud-brick? The results show that mud-brick with the predominance of fine-grained soil and the right amount of clay materials have better mechanical resistance than soil with the predominance of coarse-grained particles. Also, the size and shape of the particles, both on a microscopic and macroscopic scale, and the proportion between fine and coarse particles, are factors that affect the porosity and density of the mud-brick structure, which has a direct effect on the mechanical behavior and resistance to water absorption.

Keywords:

Historical Mud-bricks, Yazd Province, Soil Mineralogy, Characterization, Archaeometry

* Corresponding Author: Bardia.hajirasouliha@gmail.com

©2024 by the Authours.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

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۱۶۵-۱۴۵

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.1.407

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله پژوهشی

تحلیل اثر ویژگی‌های خاک بر مقاومت مکانیکی خشت‌های تاریخی استان یزد

بردیا حاجی‌رسولی‌ها[۱*]، غلامرضا کیانی ده‌کیانی[۲]، داریوش حیدری بنی[۳]، سیدمحمدامین امامی[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد حفاظت و مرمت بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استادیار گروه مرمت بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۳. استادیار گروه مرمت بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۴. استاد گروه حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی فرهنگی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

چکیده

خشت به عنوان یکی از کهن‌ترین دست‌ساخت‌های بشر، از هزاره‌های دور تاکنون، ساختمایهٔ اصلی بسیاری از بناهای تاریخی در ایران بوده است. مطالعهٔ ویژگی خشت‌های تاریخی هم از جهت مستندنگاری و ثبت اطلاعات که از اولین اقدامات حفاظت از برمانده‌ای فرهنگی است، هم از جهت ایجاد معیاری برای مقایسهٔ خشت‌های نوین امروزی، امری مهم و ضروری است. لزوم حفاظت و مرمت سازه‌های خشتی، ضرورت بررسی و شناخت این مصالح تاریخی و سنجش خصوصیات رفتاری آن را دو چندان می‌کند. چنان‌که هرگونه مداخله در بناهای تاریخی نیازمند شناخت نسبی از مواد و مصالح تشکیل دهندهٔ آن است. این تحقیق بر آن است تا با بررسی ساختار تشکیل دهندهٔ خاک، به تحلیل عوامل تأثیرگذار بر مقاومت مکانیکی خشت‌های تاریخی منطقهٔ یزد بپردازد و تلاش دارد در قالب استدلال استقرایی بر پایهٔ ترکیبی از روش‌های میدانی، تجربی، آزمایشگاهی به دنبال پاسخ به این سؤال باشد که رابطهٔ میان مقاومت مکانیکی و ویژگی خاک تشکیل دهندهٔ خشت‌های تاریخی منطقهٔ یزد چیست؟ و تنوع خاک هر منطقه، چه ویژگی‌هایی در ساختار خشت‌های تاریخی ایجاد کرده است؟ نتایج نشان می‌دهد، خشت‌هایی با غالب خاک ریزدانه و مقدار مناسب مواد رسی، مقاومت مکانیکی بهتری در مقابل خشت‌های با ذرات غالب درشت‌دانه دارند. همچنین اندازه و شکل ذرات، هم در مقیاس میکروسکوپی و هم در مقیاس ماکروسکوپی و تناسب میان ذرات ریزدانه و درشت‌دانه، از عوامل مؤثر بر تخلخل و تراکم ساختار خشت است که بر رفتار مکانیکی و مقاومت در برابر جذب آب تأثیر مستقیم دارد.

واژگان کلیدی: خشت‌های تاریخی، منطقهٔ یزد، ساختارشناسی، کانی‌شناسی خاک، باستان‌سنجی.

* نویسندهٔ مسئول مکاتبات: Bardia.hajirasouliha@gmail.com

©2024 by the Authours.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

۱. مقدمه

خشت محصولی از ترکیبات خاک است که با استفاده از آب و مواد افزودنی، توسط قالب شکل گرفته، در آفتاب خشک شده و سپس برای ساخت و ساز معماری قابل استفاده است (Sareshki et al., 2003; Falahfar, 1999). نخستین شواهد استفاده از خشت در ساخت دیوار بناهایی که هنوز ساختارهای مدور یا بیضی شکل داشتند، در اواخر هزاره دهم ق.م در نیمه غربی جنوب غرب آسیا نمایان شد (Stordeur & Ilbanez, 2008). تبدیل از جامعهٔ کوچ‌گر مبتنی بر شکار و گردآوری به جامعهٔ مستقر مبتنی بر اهلی گری گیاه و حیوان و اقتصاد معیشتی جدید، امکان شکل‌گیری سازه‌های گلی را در راستای توسعه کشاورزی بر اساس نیاز به ساختارهای ذخیره‌سازی فراهم کرد (Ripepi, 2020). مطالعات باستان‌شناسی نشان می‌دهد، نخستین نمونه‌های سازه‌های گلی در ایران، از هزاره هشتم ق.م در دره دشت‌های میان‌کوهی زاگرس شکل گرفت و در هزاره هفتم و ششم ق.م به دلایل گوناگون در مناطق پست‌تر و جلگه‌ای از جمله دامنه‌های زاگرس و دشت خوزستان، شمال فلات مرکزی و فارس، با آب و هوای معتدل‌تر رشد و توسعه پیدا کرد (Hole et al., 1969; Smith, 1991; Alizadeh, 2003; Matthews et al., 2010). استقرار اولیه انسان نوسنگی در نزدیکی دریاچه‌ها و رودخانه‌ها مانند رودخانه‌های فصلی زاگرس- کرخه، دز و کارون در دشت شوشان- دجله و فرات در بین‌النهرین و محوطه‌های شکل گرفته در حاشیه رودخانه اردن و دریای مدیترانه، نشان می‌دهد که احتمالاً خاک استفاده شده برای ساخت مصالح گلی، خاک ناشی از انباشت رسوبات طبیعی رودخانه‌ها و آبرفت‌ها با مقادیر فراوان رس و خاصیت خمیری مناسب بوده که سبب شکل‌گیری توده‌های گلی بدون قالب در اوایل عصر نوسنگی شد (Malek Shahmirzadi, 2003). ویژگی‌های خاک هر منطقه، یکی از متغیرهای مهم و تأثیرگذار در ساختار خشت‌های گوناگون است و رفتار مکانیکی آن‌ها را تعیین می‌کند. خشت‌ها به دلیل این که مستقیماً در بناهای تاریخی به کار می‌روند، رفتار آن‌ها بر رفتار بنا تأثیرگذار است. کیفیت این مصالح مفهومی نسبی است و صرف نظر از کارکرد و فرآیند ساخت، تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد سازندهٔ خاک همچون دانه‌بندی، میزان و نوع مواد چسبنده و کانی‌های موجود در خاک است. استان یزد در بخش مرکزی کویر ایران، با سابقه‌ای دیرینه در سنت ساخت و ساز معماری خشتی و تنوع بسیار گسترده‌ای از گونه خشت‌های تاریخی، یکی از مهم‌ترین مناطق مورد مطالعهٔ این مصالح در ایران محسوب می‌شود. در چند دهه گذشته، توجه ارگان‌های بین‌المللی و داخلی بر ارزش میراث خشتی شهر یزد، باعث تسریع روند مرمت و بازسازی به جهت احیاء و بهره‌برداری از بناهای خشتی شده است. بر اساس اصول حفاظت و مرمت، تولید خشت‌های امروزی، نیازمند مطالعه و بررسی ویژگی‌ها و رفتار خشت‌های تاریخی است. از این نظر مستندنگاری و شناخت ویژگی خشت‌های تاریخی، یکی از اولین قدم‌های حفاظت از این مصالح است. علاوه بر آن بررسی ویژگی‌ها و رفتار خشت‌های تاریخی می‌تواند ما را در جهت شناخت محاسن و معایب و مقایسه و بهینه‌سازی آن برای تولید خشت‌های امروزی یاری کند. ماهیت آسیب‌پذیری مصالح خاکی در برابر فرسایش‌های محیطی، عدم شناخت، ثبت و بررسی این تنوع گسترده شاید دسترسی ما را در آینده برای استخراج اطلاعات از این مصالح با مشکل مواجه کند. این پژوهش با ثبت و گردآوری خشت‌های تاریخی استان یزد و استخراج اطلاعات نهفته در آن‌ها به کمک روش‌های آزمایشگاهی (تعیین ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی) به دنبال رابطهٔ میان مقاومت مکانیکی و ویژگی‌های خاک تشکیل دهندهٔ خشت‌های تاریخی در مناطق مختلف استان است. ارائه داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند کمک شایانی به روند علمی شدن مطالعه و تولید خشت‌های نوین امروزی در منطقه یزد باشد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

با توجه به وسعت و گسترهٔ میراث معماری خشتی در ایران، مطالعات انجام شده در حوزهٔ ساختارشناسی خشت‌های تاریخی بسیار اندک است و هنوز سؤالات بسیار زیادی پیش روی محققان قرار دارد. در این قسمت معرفی برخی از مطالعات انجام شده بر روی ساختار خشت‌های تاریخی در ایران به جهت انجام مطالعات مقایسه‌ای ارائه می‌گردد.

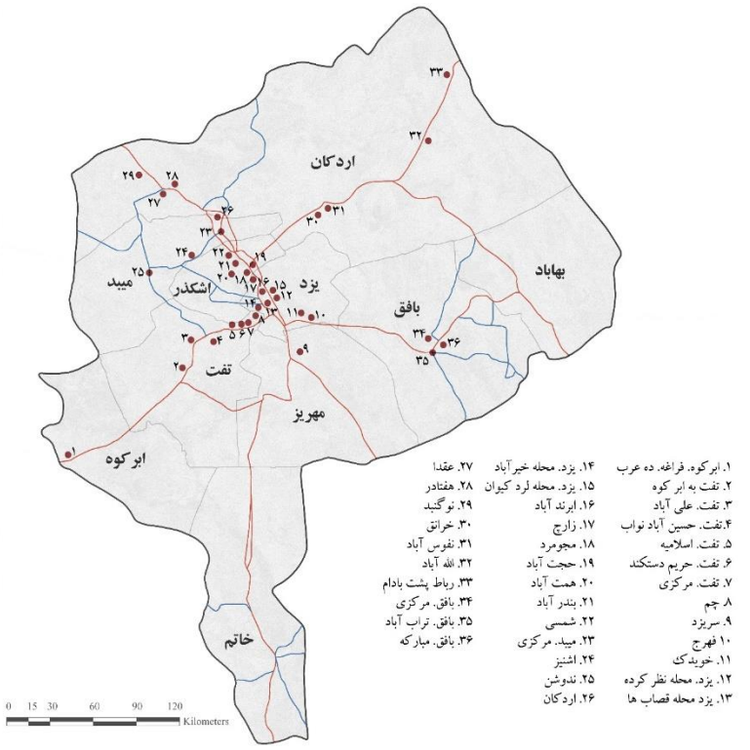
ابراهیمی به منظور امکان‌سنجی بهره‌برداری از فراورده‌های بوم‌آورد در بهینه‌سازی مصالح مرمتی، به بررسی ساختار خشت‌های تاریخی محوطهٔ چغازنبیل پرداخت. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های فیزیکی خاک (دانه‌بندی، حدود آتربرگ) نشان می‌دهد که غالب خاک خشت‌های چغازنبیل، ساخته شده از ذرات ماسه هستند و مقدار ذرات رس در این خشت‌ها بسیار اندک است. همچنین اجزای اصلی کانی‌های سازندهٔ خاک خشت‌ها را کوارتز و کلسیت- هالیت و ژیپس تشکیل داده و کانی‌های رسی مرغوب و نیز فلدسپات‌ها به میزان ناچیزی در این نمونه‌ها یافت شده است (Ebrahimi, 2013). هادیان دهکردی مطالعه‌ای گسترده‌ای بر روی خاک خشت‌های تاریخی، در برخی از محوطه‌های باستانی و مناطق مختلف ایران، از منظر ترکیبات کانی‌شناسی و خصوصیات فیزیکی خاک خشت‌ها (شاخص دانه‌بندی- شاخص خمیری) انجام داد. در نمونه خشت‌های بررسی شده، کوارتز و کلسیت، بیشترین کانی‌های سازندهٔ خاک‌های مورد استفاده در ساخت مصالح خشتی به جز منطقهٔ ماسوله و رشت شناسایی شدند. بیشترین کانی‌های رسی مانند کائولینیت در خشت‌های مناطق شمالی کشور (ماسوله و رشت) دیده شد؛ در حالی که خشت‌های مناطق جنوب شرقی ایران مانند جیرفت، کنار صندل، قلعه دختر و بم، ساختار اصلی کانی‌های رسی از جنس مونت‌موریلونیت است. همچنین در مناطق فلات مرکزی ایران با کمبود ذرات رسی و سیلتی بودن خاک مورد استفاده در ساخت خشت‌ها (مانند سیلک و اصفهان) صرف نظر از روش عمل‌آوری، وجود ترکیبات کربناتی در خاک این مناطق می‌تواند موجب استحکام مصالح گلی در طول زمان شده باشد (Hadian Dehkord, 2015). ابراهیمی و همکاران به شناخت ویژگی‌های ساختمانی و نقاط قوت و ضعف خشت‌های به کار رفته در محوطه تاریخی ارگ بم بر پایهٔ تحلیل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ساختار مکانیکی و چیستی عوامل مؤثر در شکل‌دهی به بروز تنش‌های رفتاری مصالح و چگونگی رفع یا تعدیل معایب آن پرداختند. در این تحقیق بالغ بر ۵ هزار نمونه خشت تاریخی به منظور گونه‌شناسی مصالح خشتی ارگ بم بررسی شدند. از این تعداد تنها یک چهارم خشت‌ها خصوصیات ساختمانی مناسبی در بعد ماکروسکوپی، با محوریت قرار دادن سه شاخص سطحی، استحکامی و تخلخل داشتند. از میان ۱۵ نمونهٔ بررسی شده در مسجد جامع ارگ بم، مقاومت فشاری نمونه‌ها جز در یک مورد برابر ۲۰/۱ kg/cm^2 و در مابقی نمونه‌ها بین ۷ kg/cm^2 تا ۱۳ برآورد شد که مقاومت قابل قبولی را از خود نشان ندادند. مقایسهٔ نتایج مقاومت فشاری نشان می‌دهد، در نمونه‌هایی که توزیع دانه‌بندی آن‌ها متناسب‌تر است، مقاومت فشاری افزایش یافته و مشخصاً با افزایش مقدار ماسه و گچ مقاومت فشاری نیز کاهش یافته است؛ که این امر می‌تواند ناشی از کاهش چسبندگی ذرات به دلیل کمبود نسبت مواد رسی باشد (Ebrahimi et al., 2018; Pedram, B., & Ebrahimi, 2016). حسینی کشتان و همکاران به مسئلهٔ نقش پارامترهای شیمیایی و کیفیت خاک در فرسایش خشت‌های تاریخی محوطهٔ تاریخی بلقیس اسفراین پرداختند. در این پژوهش بافت ریزدانهٔ خاک مملو از ذرات ماسه و سیلت و فقر کانی‌های رسی به همراه فازهای مخرب مسکویت و کلسیت، به عنوان عوامل مؤثر در فرایند فرسایش ناشی از رطوبت تعیین شدند (Hosseini Keshtan et al., 2018). اسکندری و همکاران پژوهشی در مورد تعیین خصوصیات خشت تاریخی و خشت جدید ایران که تقریباً بیش از نیمی از نمونه‌ها متعلق به استان یزد بود، انجام دادند. سه دسته آزمایش جهت تعیین خصوصیات مکانیکی، خصوصیات فیزیکی و ویژگی‌های کانی‌شناسی خشت‌ها بر روی ۳ گروه خشت‌های تاریخی و ۳ گروه خشت‌های جدید انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خشت‌های تولید شده‌ی امروزی مقاومت مکانیکی بهتری دارند. به طور مثال میانگین مقاومت فشاری گروه جدید ۱۲۲/۷۵ ٪ از میانگین مقاومت فشاری گروه خشت‌های تاریخی بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که درصد تخلخل خشت نیز با مقاومت مکانیکی آن رابطه معکوس و جرم حجمی خشت با مقاومت مکانیکی آن رابطهٔ مستقیم دارد. نتایج آزمون دانه‌بندی خاک گروه خشت‌ها شامل ۷/۵ تا ۰ درصد شن، ۲۰ تا ۴۸ ٪ ماسه، ۳۰ تا ۶۰ ٪ لای و ۲۰ تا ۲۶٪ رس است. حد روانی این خاک‌ها برابر ۱۹ تا ۲۷٪ - حد خمیری ۱۳ تا ۱۸٪ - و شاخص خمیری ۶ تا۱۰٪ به دست آمد. همچنین نوع خاک خشت‌های تاریخی نارین قلعه میبد و برخی نمونه‌های واقع در استان یزد، در گروه رس ضعیف، رس لای‌دار و رس لای‌دار ماسه‌دار تعیین شدند (Eskandari et al., 2019).

بررسی سوابق علمی در ایران نشان می‌دهد که تا به حال مطالعاتی صرف، به منظور بررسی ساختار خشت‌های تاریخی

منطقهٔ یزد انجام نشده یا در صورت انجام، هنوز انتشار و در دسترس محققان و پژوهشگران قرار نگرفته است. همچنین تا به امروز بیشتر مطالعات علمی انجام شده در حوزهٔ ساختارشناسی خشت‌های تاریخی، اغلب محدود به برخی محوطه‌های باستانی و یا بناهای شاخص معماری بوده است. این در صورتی است که طیف بسیار گسترده‌ای از معماری خشتی این سرزمین را بناهای روستایی و محلات واقع در بافت‌های تاریخی تشکیل می‌دهند. به همین خاطر بررسی طیف گسترده‌ای از گونه‌های خشتی و افزایش جامعه آماری مورد مطالعه، می‌تواند اطلاعات جامع‌تری از ویژگی‌های ساختمانی خشت‌های تاریخی یک منطقه و امکان مطالعات مقایسه‌ای را فراهم می‌کند.

۳. مواد و روش‌شناسی

به منظور بررسی ساختار خشت‌های تاریخی استان یزد، ۵۵ گونه خشت از ۳۶ منطقهٔ شهری و روستایی بر اساس پراکندگی آن‌ها در سطح استان (۷ شهرستان) به عنوان نمایندهٔ هر منطقه، محله یا روستا انتخاب و برای بررسی‌های آزمایشگاهی در این پژوهش نمونه‌برداری شدند؛ که به ترتیب شهرستان‌هایی با بیشترین تعداد نمونه بر اساس وسعت جغرافیایی شامل اردکان، یزد، تفت، اشکذر، بافق، میبد، ابرکوه، مهریز هستند (شکل ۱). در مطالعات میدانی، از هر منطقه یا بنا ۲ گونه خشت و در برخی بناها و روستاهایی با تعدد دوره‌های ساخت که تنوع زیادی از مصالح خشتی داشتند، بیش از یک گونه خشت نمونه‌برداری شد. به دلیل محدودیت در نمونه‌برداری از بناهای ثبتی و سایت‌های باستان‌شناسی که امکان تخمین سن آن‌ها وجود داشت و از لحاظ سلامت و نگهداری کالبدی وضعیت بهتری داشتند، ویرانه‌ها، مخروبه‌ها، متروکه‌های واقع در بیابان، قلعه‌ها، کاروانسراها، بافت‌های روستایی، محلات خالی از سکنه و بناهایی که شرایط مناسب‌تری برای نمونه‌برداری داشتند در اولویت این تحقیق قرار گرفتند. همچنین سعی شد که تا حد امکان از خشت‌هایی که در فضاهای سربسته مانند اتاق‌ها و راهروها، اسطبل و مطبخ که کمتر در معرض آسیب‌های محیطی بوده نمونه‌برداری انجام شود. به منظور اطمینان از سلامت نمونه‌ها، رج‌های رویی هر قسمت که احتمال آسیب‌دیدگی بیشتری داشتند برچیده و خشت‌های مورد نظر از عمق هر قسمت برداشته شدند (شکل ۲).



شکل ۱: موقعیت خشت‌های نمونه‌برداری شده در سطح استان یزد

شکل ۲: نمونه‌برداری خشت‌های تاریخی در سطح استان یزد

پس از گردآوری و ثبت نمونه‌ها، برنامه‌ای از آزمون‌ها به منظور مطالعهٔ ساختاری خشت‌ها تدوین شد (جدول ۱). به دلیل محدودیت در تعداد نمونه خشت‌های تاریخی و برای استفادهٔ حداکثری از نمونه‌ها در فرایند مطالعات آزمایشگاهی، ابتدا آزمون‌های تعیین مقاومت مکانیکی (خمشی، فشاری) انجام شد و پس از شکست نمونه‌ها در آزمون‌های مکانیکی، نمونه‌ها برای تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک خشت‌ها، آماده‌سازی شدند. قابل ذکر است که به دلیل شرایط سخت آماده‌سازی نمونه‌های تاریخی برای سنجش مقاومت کششی، در این پژوهش به استفاده از آزمون خمش غیرمستقیم (تحت فشار) و بررسی رفتار کششی آن‌ها اکتفا شد.

جدول ۱: برنامهٔ آزمون‌ها با ذکر هدف، ابزار و استاندارد هر آزمون

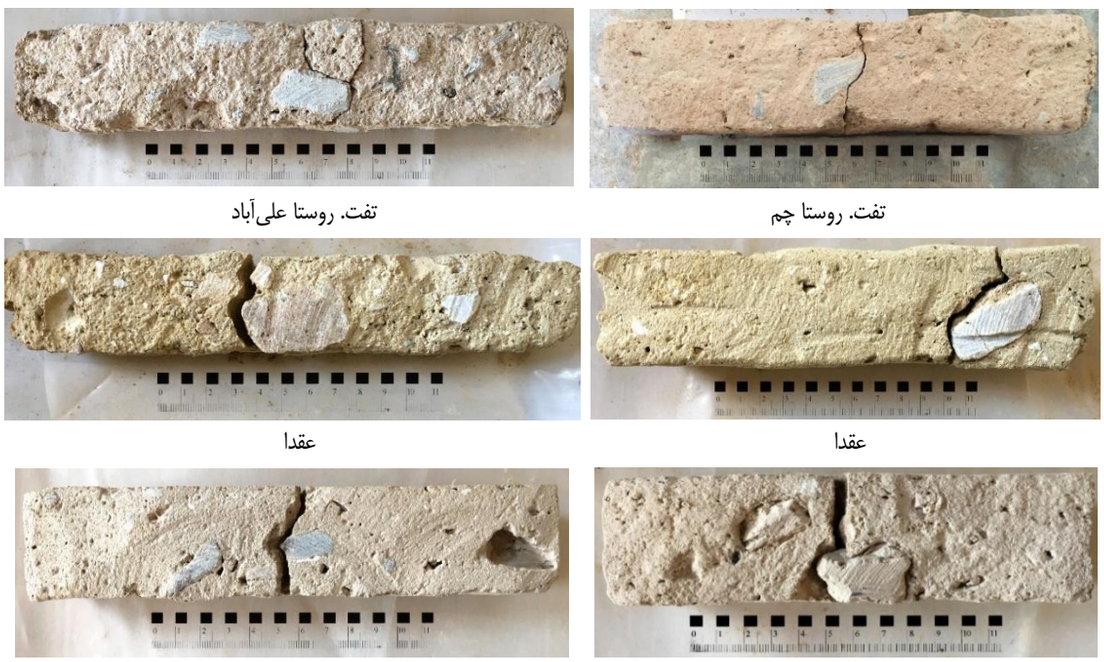
آزمون‌ها	آماده‌سازی	هدف	استاندارد	ابزار
آزمون خمش (خمش تحت فشار)	برش نمونه‌های منشوری (۵×۵×۲۰ سانتی‌متر)	بررسی دامنهٔ مقاومت کششی/ خمشی	ASTM C293M 16	دستگاه مقاومت‌سنج ele
آزمون فشاری	برش نمونه‌های مکعبی (۵×۵×۵ سانتی‌متر)	بررسی دامنهٔ مقاومت در برابر نیروی فشار قائم	ASTM D1634	دستگاه آزمون Type: CE270
آزمون جذب رطوبت	برش نمونه‌های مکعبی (۴×۴×۷ سانتی‌متر)	تعیین میزان جذب رطوبت و ارتفاع موئینگی	–	ظرف آب، اسفنج، ترازو، آون، خط‌کش
دانه‌بندی تر و خشک	تبدیل خشت به گل و گل به خاک	تعیین ذرات درشت‌دانه (شن و ماسه)	ASTM D 422-87	الک: ۳/۴. ۱/۲. ۴. ۱۶. ۳۰. ۵۰. ۱۰۰. ۲۰۰.
هیدرومتری	خاک رد شده الک ۲۰۰ (< ۰/۰۷۵ میلی‌متر)	تعیین ذرات ریزدانه (رس و سیلت)	ASTM D422-63	هیدرومتر، محلول هگزامتافسفات سدیم
اندازه‌گیری حدود آتربرگ	خاک رد شده الک ۲۰۰ (< ۰/۴۲ میلی‌متر)	تعیین خاصیت خمیری و روانی خاک	ASTM D4318-17[10]	دستگاه کاساگراند- شیارزن- آون- ترازو
تعیین فازهای شیمیایی (XRD)	۵ گرم خاک رد شده الک ۲۰۰ (< ۰/۰۷۵ میلی‌متر)	شناسایی نیمه کمی فازهای کریستالین	–	دستگاه پراش‌سنج، D8 Bruker -Advance AXS
عکس‌برداری میکروسکوپی	تهیه برش صیقلی به قطر ۲ سانتی‌متر	بررسی کیفی شکل ذرات و الگوی قرارگیری کانی‌ها	–	میکروسکوپ نوری با بزرگنمای 10xl

٤. بحث

٤-١. نتایج آزمون‌های مقاومت مکانیکی

آزمون خمش: در این آزمون ۳۲۷ مرتبه آزمون خمش بر روی ۵۵ گونه خشت تاریخی انجام شد که به طور میانگین بر روی هر نمونه ۵ تا ۶ مرتبه آزمون مقاومت انجام گرفت. نتایج مقاومت خمشی خشت‌های بررسی شده در استان یزد در بازهٔ ۰/۶ MPa تا ۲ MPa با میانگین ۱/۲۳ MPa معادل ۱۲/۵۱ kg/cm برآورد شد (جدول ۱) و (جدول ۲). در این میان بیشترین مقاومت خمشی مربوط به خشت‌های قلعه سریزد (۲ MPa)، محلهٔ نظرکرده یزد (۱/۹۳ MPa) همت‌آباد (۱/۸۵ MPa)، میبد (۱/۸۵ MPa)، هفتادر و خرانق (۱/۷۵ MPa) و کمترین مقاومت برای خشت‌های مناطق نوگنبد (۰/۶ MPa)، تفت (۰/۶۸ MPa)، یزد محلهٔ خیرآباد (۰/۷۵ MPa) ، زارچ (۰/۷۳ MPa)، مجومرد (۰/۸۱ MPa) و شاهدیه (۰/۸۲ MPa) است. بر طبق مشاهدهٔ نتایج آزمون خمش، ۴ عامل تأثیرگذار بر رفتار کششی، خمشی خشت‌ها در مقیاس ماکروسکوپی شناسایی شد.

دانه‌بندی نامتناسب: مسیر خط شکست، تحت تأثیر تنش‌های کششی، در خشت‌هایی که دارای ذرات درشت‌دانه (۵ تا ۳۰ میلی‌متر) هستند، به دلیل تقسیم نامتعادل بار وارده، از تکیه‌گاه ضعیف ذرات درشت ایجاد شده و باعث افت مقاومت خمشی این گونه خشت‌ها (عقدا، خویدک، تفت، علی‌آباد، هفتادر) نسبت به خشت‌هایی با بافت ریزدانه شد (شکل۳).



شکل ۳: مسیر شکست در نمونه‌های منشوری تحت آزمون مقاومت خمشی

الیاف گیاهی: وجود الیاف گیاهی در خشت‌های همت‌آباد (شاخه درخت)، میبد (ریزکاه)، خرانق (درشت کاه) و قلعه سریزد (درشت کاه) باعث بهبود رفتار خمشی خشت‌ها با بالاترین مقاومت در این نمونه‌ها شد. این خشت‌ها به دلیل وجود الیاف و توزیع بار نیروهای داخلی از خاک به الیاف، انعطاف بیشتری از خود نشان داده و پس از شکست نمونه‌ها تحت تنش‌های کششی، قطعات خشت مانند پلی توسط الیاف در دو طرف ترک گیردار شده و به یکدیگر متصل ماندند (شکل ۴).

مقدار الیاف: افزودن بهینه الیاف کاه به مقدار ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ ٪ (درصد وزنی در ۸۰۰ گرم خاک) در خشت‌هایی که مقدار

رس بین ۱۵ تا ۲۸٪ بوده (همت‌آباد، خرانق، سریزد، میبد و هفتادر) به عنوان یک عضو کششی، باعث افزایش مقاومت خمشی از MPa ۱/۶ تا ۲ شد. در صورتی که افزایش بیش از حد مقدار بهینه الیاف (۰/۱ تا ۰/۳٪) در نمونه‌هایی مانند حجت‌آباد (۱-۲)، ندوشن (۱)، نفیس‌آباد، عقدا، چم و رباط پشت‌بادام که غالب خاک آن‌ها را ذرات شن و ماسه تشکیل داده، باعث کاهش مقاومت خمشی در بازه MPa ۸۴ /۰ تا ۱ شد.

شرایط آماده‌سازی و عمل‌آوری ملات اولیه: از دیگر عوامل مؤثر بر مقاومت مکانیکی مصالح خشتی شناسایی شد. وجود کلوخه‌های رسی غیرمنسجم از بافت خشت در نمونه‌های مجومرد (نمونه ۱) و خرانق (نمونه ۳) به دلیل عمل‌آوری نامناسب ملات اولیه و کاهش یکپارچگی و پراکندگی نامناسب مواد چسباننده و حفره‌ها و فرورفتگی‌هایی که در سطح و عمق نمونه‌ها ایجاد شده، باعث افت شدید مقاومت خمشی در این نمونه‌ها شد. به طور مثال در دو نمونه خشت مجومرد، مقاومت نمونه‌ای با کلوخه‌های رسی غیرمنسجم، ۵۰٪ کمتر از نمونهٔ دیگر است. همچنین در بین چهار نمونه از خشت‌های خرانق که به طور میانگین مقاومت خمشی بسیار خوبی از خود نشان دادند، یک نمونه (خرانق ۳)، به دلیل وجود حفره‌هایی ناشی از کلوخه‌های رسی عمل‌آوری نشده و وجود ریزترک‌هایی قابل مشاهده در اطراف این ذرات، مقاومتی کمتر از ۵۰٪ دیگر نمونه‌ها داشت (شکل ۵).

شکل۴: اتصال قطعات خشت توسط الیاف گیاهی پس از شکست در آزمون مقاومت خمشی (چپ: همت‌آباد- راست: سریزد)

شکل۵: کلوخه‌های رسی غیرمنسجم (مجومرد، نمونه ۲)

آزمون مقاومت فشاری: در آزمون فشار نیز ۳۴۷ آزمون بر روی ۵۲ نمونه خشت تاریخی انجام شد که به طور میانگین بر روی هر نمونه ۵ تا ۶ مرتبه آزمون مقاومت انجام گرفت. مقاومت فشاری خشت‌های تاریخی مناطق مورد مطالعه در استان یزد، در بازه MPa ۲ تا ۴/۵ با میانگین MPa ۳/۰۳ برآورد شد. در این میان بیشترین مقاومت فشاری برای خشت‌های خرانق (MPa ۴/۵)، محلهٔ نظرکرده یزد (MPa ۴) همت‌آباد (MPa ۳/۹) است و کمترین مقاومت برای خشت‌های تفت (MPa ۲/۰۳)، شاهدیه و ندوشن (MPa۲/۱) هستند (جدول ۱) و (جدول ۲). نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری و خمشی خشت‌ها، در بسیاری از نمونه‌ها رابطه مستقیمی با یکدیگر دارند. نمونه‌هایی مانند میبد، همت‌آباد، خرانق، بندرآباد، هفتادر، محلهٔ نظرکرده، قلعهٔ سریزد و فهرج که مقاومت فشاری آن‌ها بیش از MPa ۳/۵ است، مقاومت خمشی آن‌ها نیز بالاتر از میانگین کلی (MPa ۱/۵) قرار دارد. همانند نتایج آزمون خمش، درصد بهینهٔ الیاف (۰/۰۵ تا ۰/۰۷ ٪) در آزمون فشار نیز باعث بهبود کارایی خشت‌های ریزدانه شده و افزایش آن بیش از مقدار بهینه در نمونه‌های حجت‌آباد، نفیس‌آباد، چم، رباط پشت‌بادام و اسلام‌آباد باعث افت مقاومت فشاری در این نمونه‌ها شد (شکل ۶). همچنین نمونه‌هایی که دارای بیش از ۵۰٪ ذرات ریزدانه۱ هستند، وجود ۱ تا ۸٪ ذرات شن ریزدانه (۲ تا ۵ میلی‌متر) در بسیاری از نمونه‌ها باعث افزایش

مقاومت فشاری شده است. در صورتی که با افزایش ۱۰ تا ۳۰٪ ذرات شن و بزرگ شدن قطر آن‌ها (۵ تا ۲۰ میلی‌متر) در نمونه خشت‌های منطقه تفت که ذرات ریزدانه آن‌ها کمتر از ۵۰٪ و ذرات شن بیش از ۲۰٪ هستند، مقاومت فشاری کاهش یافته است. همچنین با افزایش مقدار ماسه در خشت‌هایی مانند بافق و شمسی که دچار کمبود ذرات ریزدانه رسی و فراوانی ذرات ماسه (۶۰٪) هستند، شاهد افت مقاومت فشاری هستیم.

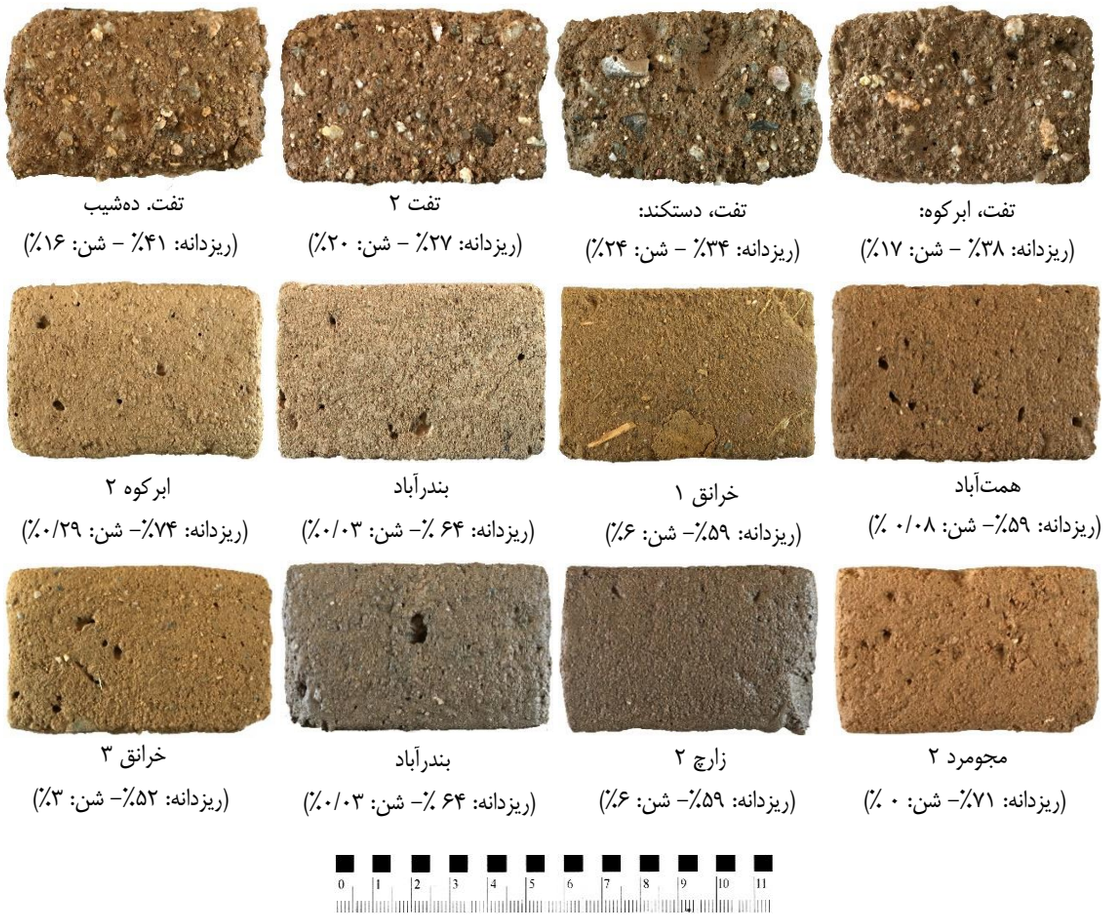
شکل ۶: نمونه‌های مکعبی تحت آزمون مقاومت فشاری

۲-٤. آزمون تعیین میزان جذب رطوبت

به منظور بررسی میزان جذب رطوبت در مصالح خاکی مانند خشت، استاندارد مشخصی از سوی سازمان استاندارد ایران تدوین نشده است. به همین دلیل برای سنجش میزان جذب رطوبت (غیرمستقیم) و بررسی انتقال آن بر اساس خاصیت موئینگی، آزمونی توسط نگارندگان تنظیم شد[۲]. در این آزمون جهت بررسی سطوح مرطوب، ۵۴ نمونه خشت تاریخی آزمایش شدند. میزان جذب آب در تمام نمونه‌ها، در مدت ۲۰ دقیقه آزمون، در بازه ۲ تا ۱۸ ٪ برآورد شد و بر اساس مقدار جذب آب در ۳ گروه قرار گرفتند. ۱. جذب آب ۱۰ تا ۲۰٪ (۱۷ نمونه- ۲۵٪ کل)؛ ۲. جذب آب ۵ تا ۱۰٪ (۳۱ نمونه- ۴۶٪) و ۳. جذب آب ۲ تا ۵ ٪ (۱۹ نمونه- ۲۸٪) (شکل ۷). نتایج نشان می‌دهد تقریباً نیمی از کل نمونه‌ها (۴۶٪) در بازه ۵ تا ۱۰٪ جذب رطوبت داشتند. بیشترین میزان جذب در بازه ۱۰ تا ۱۸٪ در خشت‌های مناطق مجومرد (۱۸-۱۳ ٪)، حجت‌آباد (۱۸-۱۲ ٪)، هفتادر (۱۳ ٪) زارچ (۱۱-۱۲ ٪)، الله‌آباد (۱۵-۱۰ ٪)، بافق روستای مبارکه (۱۳ ٪)، خرانق۳ (۱۶ ٪) و کمترین مقدار جذب آب در خشت‌های محلهٔ نظرکرده (۲ ٪)، محلهٔ خیرآباد (۲ تا ۳٪)، سریزد (۲ ٪)، شمسی (۳ تا ۵ ٪)، تفت، اسلام‌آباد، ده‌شیب، علی‌آباد، مسیر ابرکوه و روستای چم (۳-۴ ٪) است. همچنین در مقایسه نمونه‌های بررسی شده، خشت‌هایی که دارای بافت خاک درشت‌دانه هستند، میزان جذبی در حدود ۲ تا ۵ ٪ داشته (منطقه تفت) و خشت‌هایی با غالب خاک ریزدانه (رس و سیلت) و کاهش مواد درشت‌دانه (شن و ماسه) در حدود ۵ تا ۱۸٪ جذب آب داشتند (جدول ۱) و (جدول ۲).

۳-٤. نتایج آزمون‌های مشخصات فیزیکی

برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت تعیین مشخصات فیزیکی خاک، خشت‌های خرد شده در آزمون‌های مقاومت فشاری و خمشی، با غوطه‌وری در آب ابتدا تبدیل به توده‌های گل شده و پس از خشک شدن در دمای محیط تبدیل به پودر خاک شدند و مورد سنجش آزمون دانه‌بندی به روش تر و خشک قرار گرفتند (شکل ۸). بر اساس نتایج آزمون، بیشترین فراوانی ذرات خاک خشت‌ها به ترتیب مربوط به ذرات ماسه (۴۲٪) و لای (۲۶٪) و کمترین پراکندگی مربوط به ذرات رس (۱۵٪) و شن (۵٪) است. بر طبق نتایج دانه‌بندی، از ۵۳ نمونه خاک خشت‌های تاریخی، ۳۰ نمونه از خاک‌هایی که ترکیبات تقریباً متفاوتی با یکدیگر داشتند، از طریق دو آزمون هیدرومتری[۳] و حدود آتربرگ[۴] بررسی شدند (جدول ۳).



شکل ۷: بافت نمونه‌های خشت پس از آزمون جذب رطوبت

جدول ۲: نتایج آزمون‌های مقاومت مکانیکی و میزان جذب رطوبت

	مشخصات نمونه	مقاومت خمشی (MPa)	تعداد آزمون	مقاومت فشاری (MPa)	تعداد آزمون	جذب آب (%)
۱	ابرکوه، ده عرب (نمونه ۲)	0.88	8	3.55	4	5.7
۲	ابرکوه، ده عرب (نمونه ۳)	1.08	7	3.43	4	6.3
۳	اردکان، خانه کرامت	1.44	6	3.17	14	9.1
۴	الله‌آباد	1.02	6	3.24	6	10.5
۵	اشکذر، همت‌آباد	1.85	6	3.9	5	5.9
۶	اشنیز	0.99	2	2.3	6	9.6
۷	بافق، مرکزی	1.15	14	2.67	8	7.3
۸	بافق، روستای تراب‌آباد	1.37	10	3.29	7	4.2
۹	بافق، روستای مبارکه	1.11	4	2.47	5	11.2
۱۰	بندرآباد	1.27	7	3.78	8	7.1

	مشخصات نمونه	مقاومت خمشی (MPa)	تعداد آزمون	مقاومت فشاری (MPa)	تعداد آزمون	جذب آب (%)
۱۱	تفت (نمونه ۱)	1.15	6	3.14	4	4.2
۱۲	تفت (نمونه ۲)	0.73	4	2.45	2	4.5
۱۳	تفت به ابرکوه	0.68	7	2.03	7	3.6
۱۴	تفت، روستای اسلام‌آباد	1.09	9	2.86	7	5.8
۱۵	تفت، روستای ده‌شیب	1.03	9	2.55	11	4.4
۱۶	تفت، روستای علی‌آباد	1.47	3	2.68	3	4.5
۱۷	تفت، حریم دستکند تفت	1.19	11	3.07	7	3.2
۱۸	تفت، روستای چم	1.01	3	2.78	6	4.2
۱۹	حجت‌آباد (نمونه ۱)	0.84	6	2.91	3	9.4
۲۰	حجت‌آباد (نمونه ۲)	1.00	7	2.8	7	15
۲۱	خرانق (۱)	1.65	9	4.49	6	8.1
۲۲	خرانق (۲)	1.45	9	4	5	7.6
۲۳	خرانق (۳)	0.88	6	3.18	5	16.1
۲۴	خرانق (۴)	1.76	5	4.24	5	7.5
۲۵	خویدک	1.29	5	2.82	8	6.7
۲۶	رباط پشت بادام	0.99	3	2.23	6	7.6
۲۷	زارچ (نمونه ۱)	0.73	4	3.33	4	9.3
۲۸	زارچ (نمونه ۲)	1.28	7	3.33	5	14
۲۹	سریزد (نمونه ۱)	1.92	7	3.35	9	3.6
۳۰	سریزد (نمونه ۲)	1.45	7	3.19	9	7.2
۳۱	سریزد (نمونه ۳)	2.00	5	3.12	9	3.4
۳۲	شاهدیه (نمونه ۱)	0.82	5	2.10	7	5.1
۳۳	شاهدیه (نمونه ۲)	1.26	5	2.52	6	4.9
۳۴	شمسی (نمونه ۱)	1.14	9	3.12	7	4.9
۳۵	شمسی (نمونه ۲)	1.33	5	3.15	6	3.7
۳۶	عقدا (نمونه ۲)	1.01	4	2.89	6	7.8
۳۷	عقدا (نمونه ۳)	1.43	6	3.05	9	14.2
۳۸	فهرج	1.49	8	3.63	5	5.2
۳۹	مجومرد (نمونه ۱)	0.81	2	3.06	5	9.1
۴۰	مجومرد (نمونه ۲)	1.16	6	2.86	6	16.2
۴۱	میبد (نمونه ۱)	1.85	6	3.64	12	7.5
۴۲	میبد (نمونه ۲)	1.72	6	3.65	14	6.8

مشخصات نمونه		مقاومت خمشی (MPa)	تعداد آزمون	مقاومت فشاری (MPa)	تعداد آزمون	جذب آب (%)
۴۳	نفیس‌آباد	0.97	5	ND	ND	4.6
۴۴	ندوشن (نمونه ۱)	1.04	4	2.16	5	6.3
۴۵	ندوشن (نمونه ۳)	1.22	2	2.81	6	6.7
۴۶	نوگنبد	0.60	3	ND	ND	4.2
۴۷	هفتادر (نمونه ۲)	1.76	7	3.87	9	13.4
۴۸	هفتادر (نمونه ۳)	1.58	7	3.63	6	13.1
۴۹	یزد، محلهٔ دروازه قصاب‌ها	1.39	6	2.78	12	5.7
۵۰	یزد، محلهٔ لرد کیوان	0.81	4	ND	ND	2.3
۵۱	یزد، محلهٔ خیرآباد (نمونه ۱)	0.75	4	2.30	4	2.9
۵۲	یزد، محلهٔ خیرآباد (نمونه ۲)	1.31	4	2.88	5	3.3
۵۳	یزد، محلهٔ خیرآباد (نمونه ۳)	1.08	6	3.30	3	2.2
۵۴	یزد، محلهٔ نظرکرده (نمونه ۱)	1.93	6	4.03	9	2.4
۵۵	یزد، محلهٔ نظرکرده (نمونه ۲)	1.28	5	2.75	10	6.1
میانگین		**1.23**	**327**	**3.03**	**347**	**7**

شکل ۸: مراحل آماده‌سازی پودر خاک

٤-٤. تعیین حدود آتربرگ و دامنه فعالیت خاک

در بین ۳۰ نمونه از خاک خشت‌هایی که در آزمون آتربرگ بررسی شدند، ۳ نمونه بدون خاصیت خمیری (NP)[۵] و ۲۷ نمونه دارای ویژگی خمیری هستند. در این ۲۷ نمونه، حد خمیری خاک‌ها در بازه ۱۳ تا ۲۲ ٪، حد روانی در بازه ۱۷ تا ۲۹٪ و شاخص خمیری در بازه ۲ تا ۹ ٪ محاسبه شد. بر اساس رابطهٔ بین شاخص خمیری و حد روانی، موقعیت گروه خاک‌ها در نمودار پیشنهاد شده توسط کاساگرانده، نشان می‌دهد که خاک اغلب خشت‌های تاریخی منطقه یزد در گروه رس- لای‌دار- ماسه‌دار (CL-ML)[۶]، لای- ماسه‌دار (ML)[۷] و رس با خاصیت خمیری کم (CL)[۸] قرار دارند. به طوری که حدود ۶۰٪ نمونه‌ها در گروه خاک‌های رس- لای‌دار- ماسه‌دار با خاصیت خمیری کم و فقط ۱ نمونه (میبد) در گروه خاک‌های رسی قرار می‌گیرند. همچنین شاخص فعالیت[۹] خاک خشت‌ها حداقل (۰.۱۲) و حداکثر (۰.۳۵) را نشان می‌دهد که تقریباً در محدودهٔ کانی‌های کوارتز تا مسکوویت با فعالیت کم کانی‌های رسی قرار دارند. بر همین اساس می‌توان چنین استنباط کرد که به دلیل فقدان کانی‌های رسی و قرارگیری فعالیت گروه خاک‌ها در محدودهٔ فلدسپات‌ها و میکاها و نبود کانی‌های فعال رسی مانند مونتموریلونیت، پدیدهٔ تورم[۱۰]، ناشی از وجود کانی‌های سدیم‌دار مانند اسمکتیت، در خاک خشت‌های تاریخی منطقه یزد وجود ندارد (Das, 2012).

٤-٥. آزمایش کانی‌شناسی (XRD)

بر اساس نتایج آزمون‌های فیزیکی، ۲۰ نمونه از خاک خشت‌ها به منظور شناسایی فازهای اصلی و فرعی کانی‌های موجود در خاک، با استفاده از آزمون طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) مورد آزمایش کانی‌شناسی قرار گرفتند. مطابق نتایج فازیابی پراش اشعه ایکس، شش نوع کانی ثابت و مشابه در همهٔ نمونه‌ها شناسایی شد که میانگین درصد نیمه کمی فازها به ترتیب مربوط به کوارتز، کلسیت، آلبیت، دولومیت، ورمیکولیت و مسکوویت هستند (شکل ۹).

کوارتز (SiO_2) با میانگین حدوداً ۴۷/۸ ٪، مربوط به فراوانی سیلت (لای) در خاک سازنده خشت‌های تاریخی این منطقه است. فراوانی ذرات کوارتز با خصوصیات زمین‌شناسی نواحی بیابانی و با وجود رسوبات ماسه و لای فراوان در این ناحیه نیز مطابقت دارد (Eskandari et al., 2019).

کلسیت ($CaCO_3$) با میانگین حدود ۳۱/۶ ٪ دومین کانی شناسایی شده از نظر فراوانی خاک سازنده خشت‌هاست. کلسیت موجود در این خاک‌ها به احتمال زیاد، منشأ رسوبی دارند و به دلیل عدم پخت سنگ آهک‌های اولیه و عدم واکنش اکسید کلسیم با آب برای تبدیل شدن به هیدروکسید کلسیم، خاصیتی چسبنده، واکنش‌پذیر و شکل‌دهنده در ساختار خاک ندارد. کربنات کلسیم به دلیل سختی پایینی که نسبت به کوارتزها و فلدسپات‌ها دارد، اگر در مواجهه با هوا، رطوبت یا باران‌های اسیدی قرار بگیرند به آرامی تخریب و شسته شده و با خروج آن از ساختار خشت و ایجاد حفره‌هایی در مصالح، بستر مناسبی را برای جذب رطوبت فراهم می‌کند (Eskandari et al., 2019).

آلبیت ($NaAlSi_3O_8$) با مقدار متوسط ۶/۵ ٪ از لحاظ فراوانی، سومین کانی در میان کانی‌های سازنده خاک خشت‌ها است. آلبیت مانند کوارتز جزو کانی‌های غیر پلاستیکی و از گروه خانواده فلدسپات‌ها و یک پلاژیوکلاز فلدسپار نوع سدیک (غنی از سدیم) است که بیشتر منشأ آذرین دارد ولی در رسوبات نیز یافت می‌شود (Emami, 2019). آلبیت به شکل سیلت، بدون خاصیت چسبندگی و به عنوان یک پُرکننده در ساختار خشت‌ها عمل می‌کند.

مسکویت ($KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$) با میانگین حدود ۴/۲٪ به عنوان یک کانی شبه‌رسی از خانواده میکاها، با خاصیت نیمه پلاستیکی، کمترین درصد را در میان ساختار کانی‌شناسی خشت‌های تاریخی این منطقه دارد.

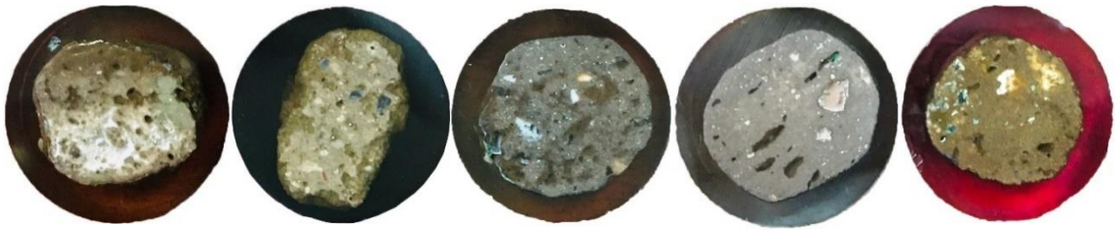
ورمیکولیت[۱۱] به عنوان تنها کانی شناسایی شده از خانوادهٔ رس‌ها، بعد از موسکویت، با حدود ۴/۵ ٪ کمترین مقدار را در ساختار خشت‌ها تشکیل می‌دهد. ورمیکولیت حاصل فرسایش و هوازدگی فلوگوپیت و بیوتیت در محیط‌های هیدروترمال[۱۳] است و یکی از ساختارهای حد واسط و بسیار پیچیده در رس‌هاست که با ساختار مونوکلینیک در طبیعت یافت می‌شود.

ورمیکولیت در اثر تجزیه میکاها تولید شده و در قسمت میانی ورقه‌های رس حاوی مولکول‌های آب و یون‌های قابل تبادل Mg^{2+} است؛ و مانند اسمکتیت به واسطه جذب آب در بین لایه‌های خود خاصیت بادشدگی و تورم نیز دارد (Emami, 2019). ولی به طور کلی ورمیکولیت کمتر از اسمکتیت متورم شده، زیرا فاصله بین لایه‌ای آن‌ها کمتر بوده و پیوند قوی کاتیون‌های بین لایه‌ای در ورمیکولیت، لایه‌های ۲:۱ را در کنار هم نگه داشته و فاصله لایه‌ها را در ۱/۴ نانومتر محدود کرده است (Barton & Karathanasis, 2002). ورمیکولیت نسبت به دیگر خانواده رس‌ها (به غیر از مونت موریلونیت‌ها) سطح مخصوص بیشتری دارد و به دلیل جذب قابل توجه مولکول آب در بین لایه‌های گیبسیت، بستر گسترده‌تری را برای پیوند ذرات برقرار می‌کند. مقدار کم این کانی در خاک‌های مورد استفاده برای ساخت مصالح گلی در منطقه یزد، به دلیل چسبندگی مناسبی که ایجاد می‌کند پیوند خوبی بین ذرات برقرار کرده و مقاومت مصالح را افزایش می‌دهد. ولی در صورتی که مقدار آن در ساختار خاک افزایش یابد و یا در معرض فرسایش‌های آبی قرار بگیرند، دچار تورم شده و پس از خشک شدن و خروج مولکول‌های آب باعث ایجاد حفره‌ها و فضاهای خالی در ساختار مصالح می‌شود. همچنان که در بروز اتفاقاتی مانند سیل و بارندگی‌های شدید در این منطقه، آسیب‌های به وجود آمده در بناهای خشتی بسیار زیاد است و توان و تاب‌آوری لازم در برابر فرسایش‌های آبی را ندارند.

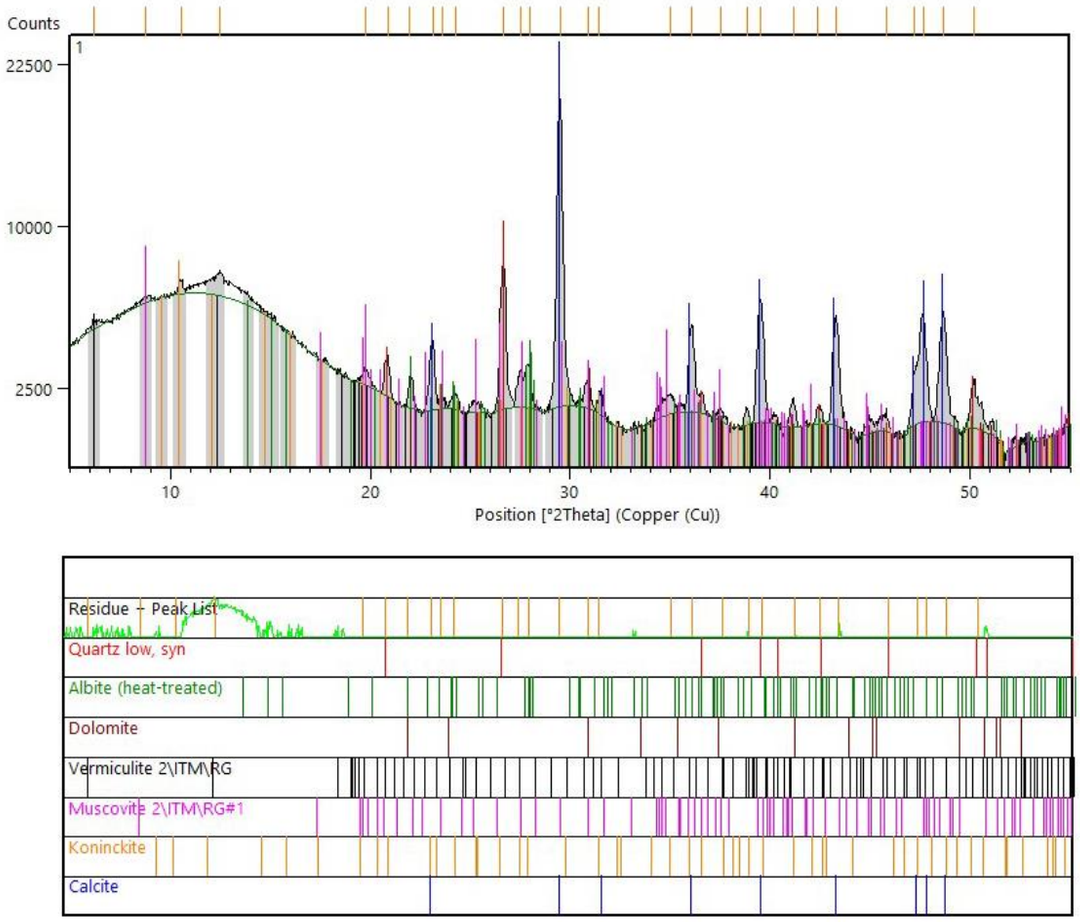
به طور کلی احتمالاً خاکی که برای ساخت خشت‌های تاریخی در منطقه یزد مورد استفاده بوده، ترکیبی از هوازدگی سنگ‌های آهکی (به دلیل وجود کلسیت و دولومیت)، ماسه‌سنگ‌ها (به دلیل وجود کوارتز) و سنگ‌های آذرین (به دلیل وجود ورمیکولیت و مسکوویت) و در کل یک خاک نابرجا یا چند منشأ بوده است (Eskandari et al., 2019). وجود درصد بالای کانی‌های مقاوم مانند کوارتز، علاوه بر این که می‌تواند مقاومت مکانیکی خشت را افزایش دهد، در خاک‌هایی که با فقر کانی‌های رسی مواجه هستند، می‌تواند باعث افت مقاومت شود. به طور مثال در نمونه خشت‌های رباط پشت‌بادام و نفیس‌آباد با وجود بالا بودن فاز کوارتز (حدود ۶۰٪) و کاهش فاز کانی‌هایی رسی و شبه‌رسی مانند ورمیکولیت و موسکویت، شاهد کاهش مقاومت مکانیکی این خشت‌ها هستیم. همچنین در نمونه خشت اشنیز، بالا بودن فاز کلسیت (۶۷٪) و کاهش شدید فاز کوارتز (۱۹٪) موسکویت (۲٪) و ورمیکولیت (۴٪)، باعث افت شدید مقاومت شده است. در عوض، کاهش فاز کلسیت در نمونه‌های میبد (۱۷٪)، خرانق (۲۴٪) و بندرآباد (۳۰٪) به همراه افزایش فاز آلبیت و مقدار متوسط مسکوویت و ورمیکولیت با بیشترین درصد، باعث افزایش قابل توجه مقاومت مکانیکی در این نمونه‌ها شده است. همچنین نتایج کانی‌شناسی نشان می‌دهد که خاک خشت‌های تاریخی منطقه یزد، دچار فقر کانی‌های رسی و فراوانی فازهای کوارتز و کلسیت هستند. تنها کانی شناسایی شده از خانوادهٔ رس‌ها ورمیکولیت است که یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد خاک‌های این منطقه محسوب می‌شود و به دلیل سطح مخصوص و پیوند قوی کاتیون‌های بین لایه‌ای، رفتار خمیری مناسبی داشته و مقدار کم آن در ساختار خاک، می‌تواند چسبندگی مورد نیاز برای تولید مصالح گلی را فراهم کند. وجود فراوان فاز کلسیت به مقدار ۲۰ تا ۶۰٪، این سؤال را مطرح می‌کند که آیا کلسیت شناسایی شده در آزمون کانی‌شناسی، مشتق شده از سنگ‌های آهکی‌ای بوده که در رسوبات خاک وجود داشته و یا به صورت افزودنی‌هایی به ترکیب ملات گل اضافه شده است؟ بر همین اساس، برای تشخیص فعال بودن کلسیت موجود در خاک، از دو آزمون تعیین عدد pH با کاغذ تورنوسل و استفاده از شناساگر فنل‌فتالئین (به دو صورت محلول در آب و پاشش بر سطح مقطع نمونه) جهت سنجش میزان قلیایی بودن خاک خشت‌ها استفاده شد. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد pH تمام نمونه‌ها در محدودهٔ خنثی (۷) قرار دارد و در آزمون فنل نیز در هیچ یک از نمونه‌ها نشانی از ارغوانی شدن محلول و سطح مقطع خشت‌ها مشاهده نشد. بر همین اساس می‌توان این نتیجه را گرفت که کلسیت موجود در این خاک‌ها خاصیت قلیایی و واکنش‌پذیری نداشته و به احتمال زیاد درصد غالب آن را کلسیت‌های اولیه تشکیل داده‌اند و در صورت افزودن مواد کربناتی مقدار آن بسیار ناچیز بوده و یا فرایند واکنش آن نیز ناقص و یا متوقف شده است.

٦-٤. مشاهدات میکروسکوپی

به منظور انجام مطالعات تکمیلی و بررسی کیفی تراکم، تخلخل، اندازه، شکل و پراکندگی کانی‌های موجود در ساختار خشت‌ها، ۱۶ نمونه مقطع صیقلی به قطر ۲ سانتی‌متر به منظور عکس‌برداری میکروسکوپی تهیه شد (شکل ۹).



شکل ۹: مقاطع صیقلی خشت به قطر ۲ سانتی‌متر



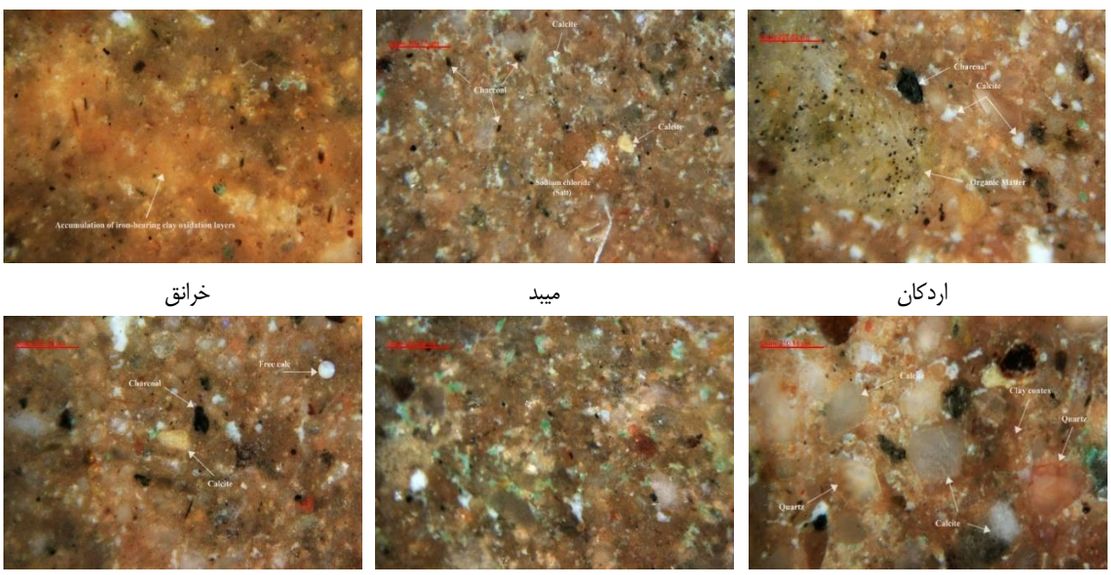
شکل ۱۲: الگوهای فازیابی آزمایش کانی‌شناسی XRD

نتایج بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که بافت نمونه خشت‌هایی با ذرات غالب ریزدانه مانند خرانق، میبد، اردکان، همت‌آباد و بندرآباد هم به دلیل درصد بیشتر ذرات رس و هم به دلیل اندازه ریزدانه ذرات کوارتز و کلسیت، دارای بافتی همگن، بدون حفره‌های درشت و قابل رؤیت (در مقیاس ۲۰۰ نانومتر) با تراکم نسبی بیشتر نسبت به خشت‌هایی با خاک‌های درشت‌دانه هستند (شکل ۱۰). همچنین نمونه خشت‌هایی با بافت درشت‌دانه مانند نفیس‌آباد، ابرکوه، رباط

پشت‌بادام و اشنیز، به دلیل اندازه درشت و پراکنده ذرات کوارتز و کلسیت و کاهش مواد رسی، دارای همگنی و تراکم کمتر و تخلخل بیشتر نسبت به خشت‌هایی با خاک ریزدانه هستند. همین امر یکی از دلایل قابل توجه کاهش مقاومت مکانیکی این گونه خشت‌ها است (شکل ۱۱).

در راستای نتایج آزمون فازیابی اشعه ایکس (شکل ۱۲)، در مقطع بیشتر نمونه‌ها آثاری از مواد کربناتی، قرار گرفته در زمینه‌های رسی قابل مشاهده است. این کربنات‌ها هم به صورت افزودنی و هم به صورت موادی که در ساختار اولیه خاک‌ها وجود داشته به سه حالت دیده می‌شوند. ۱.کلسیت/ کربنات کلسیم ($CaCo_3$)؛ ۲. اکسید کلسیم/ آهک آزاد (CaO) و ۳. کلسیت ثانویه. وجود آهک‌های آزاد، بالأخص در نمونه خشت‌های درشت‌دانه به شکل ذرات درشت سفید رنگ، نشان از افزودن مواد آهکی به ترکیب ملات خشت دارد. این ذرات به دلیل شکفته شدن دیر هنگام و عمل‌آوری نامناسب ملات اولیه، در غالب آهک آزاد (آلوئک)[۱۳]عمل کرده و در برخی نمونه‌ها باعث ایجاد حفره‌هایی در ساختار خشت‌ها شده است (شکل ۱۳).

همچنین در نمونه خشت‌های ریزدانه مانند بافق، خرانق، همت‌آباد، الله‌آباد و اردکان، آثاری از افزودن آهک شکفته دیده می‌شود که دلیل آن می‌تواند هیدراتاسیون آهک در فرایند تولید و آماده‌سازی ملات اولیه باشد. این مواد با دیگر ذرات رسی وارد واکنش شده و آثاری از آهک‌های ثانویه، ناشی از واکنش پورتلندیت با $Co2$ و ایجاد اکسیدهای کلسیم در کنار آهک‌های اولیه شده است (شکل ۱۴).



اردکان　　میبد　　خرانق

همت‌آباد　　مجومرد　　زارچ

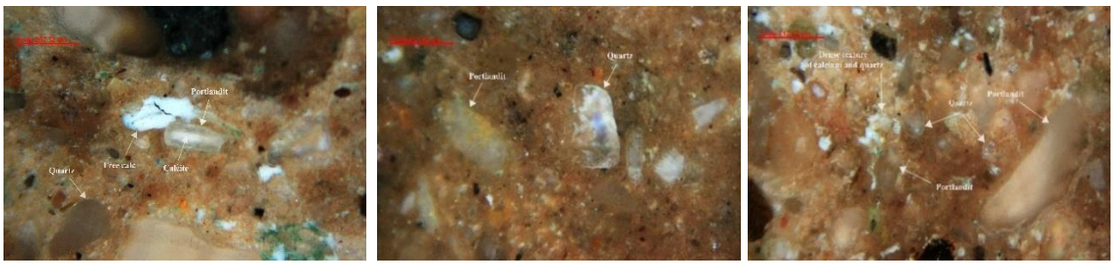
شکل ۱۰: بافت میکروسکوپی نمونه خشت‌هایی با ذرات غالب ریزدانه

اشنیز　　نفیس‌آباد　　نفیس‌آباد

شکل ۱۱: بافت میکروسکوپی نمونه خشت‌هایی با ذرات غالب درشت‌دانه

اشنیز اشنیز ابرکوه

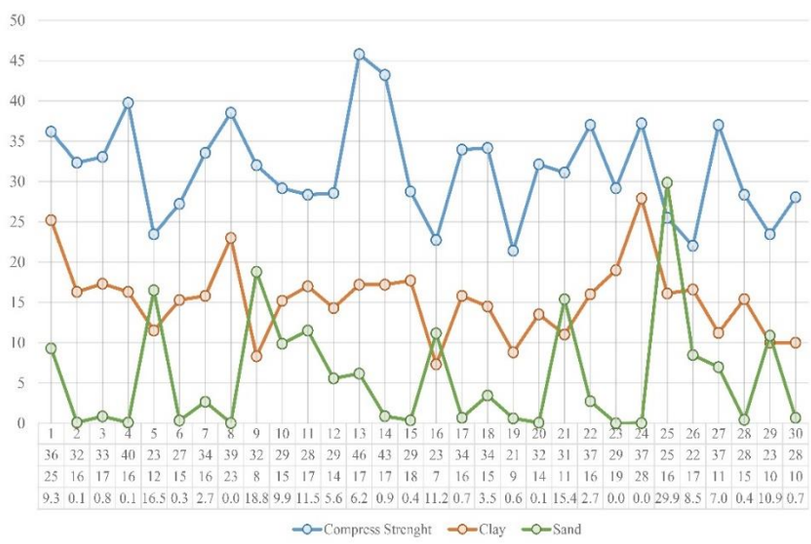
شکل ۱۳: وجود آهک‌های آزاد (آلوئک) ناشی از دیر شکفتگی و گیرش ناقص اکسید کلسیم



شکل ۱۴: وجود آثار کلسیت‌های ثانویه ناشی از واکنش پرتلندیت با Co2

۷-٤. رابطه مقاومت فشاری و پراکندگی ذرات خاک

بر طبق (شکل ۱۵)، در نمونه خشت‌های ۱-۲-۳-۴-۷-۸-۱۳-۱۴-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰-۲۲-۲۳-۲۴-۲۷ که بیش از نیمی از نمونه‌ها را شامل شده، رابطه مستقیمی بین افزایش مقدار رس و مقاومت فشاری وجود دارد. در این نمونه‌ها مقدار ذرات درشت‌دانه کمتر۱۰٪ بوده و با افزایش یا کاهش مواد رسی، مقاومت فشاری نیز کاهش یا افزایش یافته است. به طور مثال در نمونه‌هایی که مقاومت فشاری آن‌ها بیشتر از ۳۵ kg/cm^2 هستند، میزان ذرات رس بین ۱۵ تا ۳۰ ٪ بوده، در صورتی که در نمونه‌هایی با مقاومت فشاری کمتر از ۳۵ kg/cm^2، درصد ذرات رس بین ۷ تا ۱۷٪ است. همچنین در نمونه‌های اشنیز، رباط پشت‌بادام (۱۶)، نفیس‌آباد (۲۵)، ندوشن (۲۶) و خیرآباد (۲۹)، وجود ۸ تا ۳۰٪ ذرات شن و کمبود مواد رسی بین ۷ تا ۱۷٪ باعث کاهش شدید مقاومت فشاری در این نمونه‌ها شده است (شکل ۱۵).

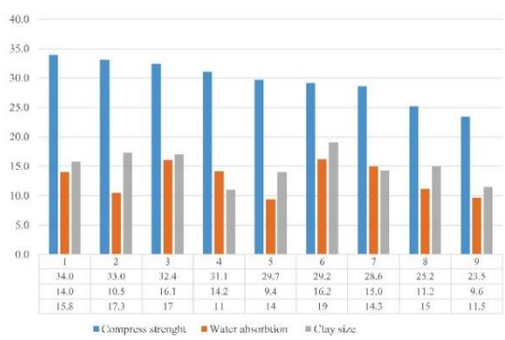


شکل ۱۵: رابطه میان مقاومت فشاری و درصد ذرات خاک در ساختار خشت‌ها (شماره‌گذاری بر طبق جدول ۳)

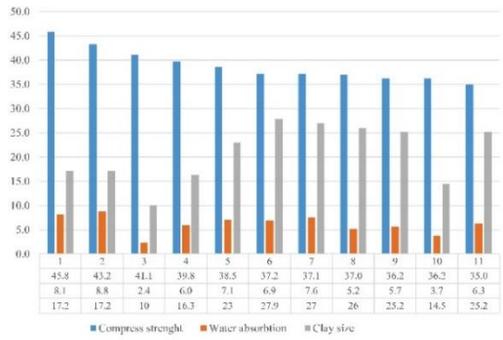
سمینسکی در مطالعات خود نشان می‌دهد، خاک‌هایی که از لحاظ دانه‌بندی تناسب تقریباً یکسانی با یکدیگر دارند، زنجیره انتقال نیرو به صورت یکدست در تمام سطوح پخش شده و با بزرگ شدن نامتناسب اندازه ذرات، زنجیره انتقال نیرو توسط ذرات کوچکتر به سمت ذرات بزرگتر متمایل شده و با تمرکز تنش در اطراف ذرات درشت‌دانه و انتقال فشار بیش از حد به ذرات کوچکتر، باعث گسیختگی و شکست در ساختار مصالح می‌شود (Seminsky, 2013).

۸-٤ . رابطه مقاومت مکانیکی و میزان جذب آب

ساز و کار جذب آب در ساختار خاک با اتصال مولکول آب به رس بر مبنای قطبیت بار منفی و بار مثبت اتفاق می‌افتد. هیدراتاسیون بار منفی سطح رس با پیوند اتم هیدروژن در مولکول آب، تشکیل یک لولهٔ هیدروژنی داده و زنجیره‌ای از مولکول‌های آب را در ساختار خاک ایجاد می‌نماید. این انتقال بسته به میزان تخلخل، در ساختار هر نمونه متفاوت است. در ساختار خشت همانند دیگر مصالح متخلخل، تراکم و تخلخل، به عنوان دو عامل اثرگذار در رفتار این مصالح شناخته می‌شوند. هر چه تخلخل بیشتر و تراکم کمتر باشد، ورود مواد مایع در بین ذرات خاک راحت‌تر و سریع‌تر بوده و مولکول آب در فضای خالی بین ذرات، سطوح بیشتری را برای گسست پیوندها و افزایش فرسایش در اختیار می‌گیرد. در مقابل هرچه ساختار خاک متراکم‌تر باشد منافذ نفوذ آب کمتر و سطوح درگیر شونده با آب به حداقل می‌رسد (Hosseini Keshtan et al., 2018). الگوی تخلخل متأثر از شکل، اندازه و چیدمان ذرات، مقدار و نوع مواد رسی، شرایط آماده‌سازی ملات اولیه، نحوهٔ عمل‌آوری و تولید خشت، فشردگی ملات در قالب و آسیب‌هایی که ممکن است در ساختار خشت به وجود آمده باشد، هستند. فشار لوله‌های موئینه به دلیل کشش سطحی بین ذرات، در خاک‌های ریزدانه بیشتر از خاک‌های درشت‌دانه است. ولی در خاک‌های درشت‌دانه (شنی) به دلیل این که نیروی پیوستگی بین ذرات شن، بیشتر از نیروی پیوستگی بین مولکول آب و شن است، لوله‌های موئینه توان انتقال آب را به میان بین ذرات شن ندارند؛ بنابراین خشت‌هایی با غالب خاک ریزدانه، به دلیل فشار لوله‌های موئینهٔ و جذب آبی که توسط رس‌ها اتفاق می‌افتد، **تمایل به جذب آب** بیشتری نسبت به خشت‌هایی با خاک درشت‌دانه دارند. در گروه خشت‌های ریزدانه، در حالتی که تراکم افزایش و تخلخل کاهش یابد، به دلیل ایجاد فشردگی و کاهش منافذ، پتانسیل انتقال آب نیز کاهش یافته و همچنین توانایی تحمل تنش‌های فشاری نیز افزایش می‌یابد. نکته جالب توجه این است که بر طبق (شکل ۱۶)، نمونه‌هایی با بالاترین مقاومت فشاری (۳/۵ MPa تا ۴/۵) به غیر از دو نمونهٔ هفتادر، درصد جذب آب بین ۲ تا ۸٪ بوده ولی در نمونه‌هایی که درصد جذب رطوبت در آن‌ها بین ۱۰ تا ۱۶٪ است، مقاومت فشاری در بازهٔ ۲/۵ MPa تا ۳/۳ قرار گرفته است. در نتیجه با کاهش و افزایش مقاومت مکانیکی، مقاومت در برابر جذب آب نیز کاهش و افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که مقاومت فشاری و مقاومت در برابر جذب آب، به دلیل تأثیرگذاری عامل تخلخل و تراکم در بسیاری از مواقع، رابطهٔ مستقیمی با یکدیگر دارند.



۱. زارچ، ۲. الله‌آباد، ۳. خرانق، ۴. عقدا، ۵. حجت‌آباد (۱)، ۶. مجومرد، ۷. حجت‌آباد (۲)، ۸. بافق، مبارکه، ۹. اشنیز



۱. خرانق (۱)، ۲. خرانق (۴)، ۳. نظرکرده (۱)، ۴. همت‌آباد، ۵. بندرآباد، ۶. میبد(۲)، ۷. میبد (۱)، ۸. فهرج، ۹. ابرکوه (۲)، ۱۰ سریزد (۱)، ۱۱. ابرکوه (۳)

شکل ۱۶: نمودار رابطهٔ میان مقاومت فشاری، درصد جذب آب و میزان ذرات رس

۵. نتیجه‌گیری

بنابر نتایج آزمایش‌هایی که مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک خشت‌ها را در پی داشت، ساختار اصلی خشت‌های تاریخی منطقهٔ یزد را کانی‌های غیر پلاستیکی با مقدار بسیار کم کانی‌های رسی و شبه رسی تشکیل می‌دهند. با در نظر گرفتن نوع ثابت کانی‌های رسی و کمبود مقدار آن در این خاک‌ها، آنچه که علاوه بر مقدار و نوع رس باعث ایجاد تغییرات رفتاری در ساختار خشت‌های این منطقه می‌شود، اندازه، مقدار و پراکندگی ذرات غیر پلاستیک (سیلت، ماسه، شن) است که بر تراکم و تخلخل مصالح خشتی تأثیرگذار هستند. از بررسی بافت میکروسکوپی و دانه‌بندی نمونه‌ها مشخص شد، خشت‌هایی با فراوانی ذرات درشت‌دانهٔ کوارتز و کلسیت و کمبود مواد رسی که ناشی از ویژگی خاک‌های مناطق کوهستانی و مرتفع استان است، به دلیل بافت غیر همگن و پیوند سست بین ذرات، تحمل کمتری در برابر تنش‌های وارده دارند. در ساختار خشت‌های درشت‌دانه، مقدار مواد رسی که وظیفهٔ جذب و انتقال آب در ساختار خاک را بر عهده دارند کاهش یافته و جای آن را مواد پرکنندهٔ شن و ماسه اشغال کرده است. در این گونه خشت‌ها، با وجود این که منافذ و تخلخل بافت نمونه‌ها که در عکس‌برداری‌های میکروسکوپی مشاهده شد، بیشتر از خشت‌های ریزدانه است، ولی به دلیل اندازهٔ درشت لوله‌های موئینه و پیوند ضعیف مولکول آب با ذرات شن و کاهش کشش سطحی بین ذرات، جذب آب کمتری اتفاق می‌افتد و شاید بتوان گفت یکی از دلایل دوام و ماندگاری خشت‌های گروه شنی که بیشتر در مناطق کوهستانی و پر باران استان قرار دارند (تفت، ابرکوه، چم، اسلام‌آباد، علی‌آباد، ده‌شیب، رباط پشت‌بادام، اشنیز، نفیس‌آباد و نوگنبد) همین امر باشد. در عوض خشت‌های واقع شده در مناطق کویری و زمین‌های آبرفتی استان، به دلیل بافت ریزدانه کوارتز و کلسیت و مقدار مناسب مواد رسی، پیوند قوی‌تری بین ذرات برقرار کرده و بافتی متراکم با تخلخل کمتر و تحمل بیشتر در برابر تنش‌های وارده را به وجود آورده است. در خشت‌هایی با غالب خاک ریزدانه، مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر جذب آب، به دلیل عامل مشترک تخلخل و تراکم رابطه مستقیمی با یکدیگر دارند. بر همین اساس تراکم بالا ناشی از نیروی چسبندگی و پیوستگی بین ذرات، باعث افزایش مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر جذب آب در ساختار این گونه خشت‌ها شده است. با در نظر گرفتن ویژگی خاک منطقه، که غالب آن را ذرات ماسه و سیلت تشکیل داده، خاک‌های ریزدانه، با مقدار کم مواد چسباننده، به انسجام نسبی خوبی می‌رسند. این در صورتی است که خاک‌های درشت‌دانه، به دلیل اندازه درشت ذرات و حفره‌های بین آن‌ها، برای رسیدن به انسجام کافی، نیاز به مواد چسباننده بیشتری دارند. در نتیجه هر چه پیوند بین ذرات ریزدانه (رس و سیلت) و درشت‌دانه (شن و ماسه)، تحت تأثیر عواملی چون مقدار مادهٔ چسبنده و اندازه و شکل ذرات، قوی‌تر باشد، ذرات خاک تحمل نیروی بیشتری برای تاب‌آوری در مقابل نیروهای وارد شده از خود نشان می‌دهند.

مقایسهٔ نتایج به دست آمده در این پژوهش با دیگر پژوهش‌های انجام شده در ۱۵ منطقه مختلف ایران نشان می‌دهد که خشت‌های تاریخی فلات مرکزی ایران (یزد، میبد، کرمان، کاشان و اصفهان) با وجود این که مقاومت مکانیکی بسیار قابل قبولی دارند، دچار فقر کانی‌های رسی و فراوانی مواد کربناتی و کوارتز هستند. در بین مطالعات انجام شده، از گروه کانی‌های رسی، ورمیکولیت و کلینوکلر، با کمترین فراوانی، تنها در نمونه خشت‌های منطقه یزد و میبد، با ۲۰ نمونه‌ی آزمایش در این پژوهش و ۹ آزمایش در مطالعات اسکندری و همکاران (2019) شناسایی شد. بر این اساس می‌توان این فرض را مطرح کرد که این نوع از رس‌ها به دلایلی که نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد، مشخصه منحصر به فرد خاک‌های این منطقه است؛ و همان طور که در این مقاله ذکر آن رفت، ساختار کانی‌شناسی رس‌ها یکی از عوامل اصلی مقاومت مکانیکی قابل قبول خشت‌های این منطقه هستند.

این گونه از تحقیقات با گسترش دامنه تجزیه و تحلیل، به ارتقای کفی دانش در زمینه مصالح ساختمانی سنتی کمک می‌کند. یافته‌های علمی به دست آمده از این تحقیقات می‌تواند راهنمایی برای درک عمیق‌تر ویژگی‌های ساختاری و ترکیبات خشت باشد و تصمیم‌گیری آگاهانه در انتخاب مواد و شیوه‌های ساخت و ساز و مرمت بناهای خشتی را تسهیل می‌کند. با این حال، تحقیقات و آزمایش‌های بیشتر و بررسی نمونه‌های بیشتر از خشت‌های تاریخی، برای تقویت درک و

اصلاح استراتژی‌های کاربردی و حفظ این مصالح ساختمانی سنتی در شیوه‌های ساخت و ساز معاصر در مناطق مختلف ایران مورد نیاز است.

سپاسگزاری

مقالهٔ حاضر بخشی از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مصوب در دانشگاه هنر اصفهان با عنوان «تحلیل اثر ویژگی‌های خاک بر مقاومت مکانیکی خشت‌های تاریخی استان یزد با رویکرد گونه شناسی مصالح خشتی» است. از این رو از مسئولین دانشگاه هنر اصفهان، به جهت ایجاد شرایطی برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و پشتیبانی‌های ایشان سپاس‌گزاری می‌شود.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تحقیق و بررسی، نمونه‌برداری، انجام مطالعات آزمایشگاهی، پیش‌نویس مقاله و ویرایش. نویسنده دوم: ویرایش و نظارت انجام پروژه. نویسنده سوم: مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی نتایج آزمایشگاهی، روش‌شناسی. نویسنده چهارم: تحلیل رسمی داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی، نظارت، بررسی و ویرایش نهایی.

پی‌نوشت‌ها

۱. بر طبق تقسیم‌بندی روش متحد (USCS) منظور از خاک‌های ریزدانه، خاک‌هایی هستند که بیش از ۵۰٪ آن‌ها را ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر (سیلت و رس) تشکیل داده و منظور از خاک‌های درشت‌دانه، خاک‌هایی هستند که بیش از ۵۰٪ آن‌ها ذرات بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر (شن ماسه) تشکیل می‌دهد.

۲. در این آزمون، قطعاتی از خشت بر روی اسفنج‌هایی به ابعاد ۷ در ۱۴ سانتی‌متر، در ظرف آبی به عمق ۲ سانتی‌متر، به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند و از تفریق وزن خشک اولیه و وزن مرطوب نمونه پس از آزمون، میزان جذب رطوبت محاسبه گردید.

۳. آزمایش هیدرومتری برای شناسایی اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر و تعیین توزیع دانه‌بندی خاک‌های ریزدانه، بر طبق استاندارد (ASTM D422-63 2007) انجام می‌شود. روش هیدرومتری بر مبنای قانون استوکس، برحسب تعیین سرعت ته‌نشینی ذرات خاک در یک سیال تعریف شده است. در این آزمون برای به دست آوردن سرعت رسوب‌گذاری و درصد وزنی دانه‌های خاک از هیدرومتر یا غلظت‌سنج استفاده می‌شود. با داشتن زمان قرائت هیدرومتر و موقعیت نقطه شناوری آن می‌توان قطر مؤثر دانه‌ها را محاسبه کرد.

۴. حدود آتربرگ Atterberg به عنوان درصد رطوبت متناظر با شرایط رفتاری متفاوت سیلت‌ها و رس‌ها تعریف شده است (Heyidari et al., 2013). میزان رطوبتی (برحسب درصد) که خاک چسبنده از حالت روان به حالت پلاستیک و خمیری می‌رسد را حد روانی (LL) می‌گویند. میزان رطوبتی (برحسب درصد) که خاک از حالت خمیری به حالت نیمه خمیری و سپس جامد می رسد، به ترتیب حد خمیری (PL) و حد انقباض نامیده می شود. اختلاف عددی حد روانی و خمیری، دامنه خمیری (PI) است که مشخص کننده درصد رطوبتی است که در آن خاک در حالت خمیری می‌ماند. همچنین این حدود تابع بخش ریزدانه خاک است که از الک ۰/۴ میلی‌متر عبور می‌کند (Baziar & Salehzadeh, 2011).

5. Non-Plasticity Index

در ساختار خاک‌های ریزدانه و غیر چسبنده (خاک‌های لانه زنبوری- با خاصیت خمیری کم) ذرات سیلت و ماسه به وسیله نیروی الکترواستاتیک، با تشکیل قوس‌های زنجیره‌ای در بین ذرات، قوام خود را به دست می‌آوردند و ساختاری متخلخل و متفاوت با خاک‌های چسبنده را تشکیل می‌دهند.

6. Silty clay of low plasticity
7. Silty or clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity
8.Inorganic clays of low to medium plasticity

9. Activite

10. Swelling soils

11. $(Mg, Fe^{2+}, Al)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4(H_2O)_2$

۱۲. هیدروترمال یا پیوند گرمایی، روشی برای سنتز (ترکیب) تک بلورهاست که با انحلال‌پذیری مواد معدنی در آب گرم، تحت فشار زیاد به کار می‌رود.

13. Free Calc

فهرست منابع

Alizadeh, A. (2003). Excavations at the Prehistoric Mound of Chogha Bonut, Khuzestan, Iran, Season
1976/77, 1977/78 and 1996, Chicago.Illiois: The Univercity of Chicago Oriental Institute Punlication, Vol 101. pp.207-209.

ASTM C293 M-16. (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading).

ASTM D1634. (2017). Standard Test Method for Compressive Strength of Soil-Cement Using Portions of Beams Broken in Flexure (Modified Cube Method).

ASTM D422-63. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

ASTM D4318-17. (2000). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils

Barton,C. D., & Karathanasis, A. D. (2002). Clay Mineral. Encyclopedia of Soil Science. In book Encyclopedia of Soil Science. pp 187-192

Baziar, M. H., & Salehzadeh, H. (2011). Soil Mechanics Laboratory. Iran University of Science and Technology [In Persian]

Das, B. M. (2012). *Principles of Geotecnichal Engineering.* (Translated by Hoseyn Salehzadeh). Tehran: University of Science and Technology Publishing Center (Original work published 2006) [In Persian]

Ebrahimi, A. (2013). Measuring the feasibility of using vernaculat products in the optimization of restoration materials; Sample studied: Ziggurat of Choghazanbil. Athar Journal. No. 65: 22-3 [In Persian].

Ebrahimi, A., Aminemami, M., & Pedram, B. (2018). *Enriched Mud-Mortar and New Improved Mud-Brick by Vernacular Material for Conservation of Arg-e-Bam* (Unpubpished doctoral Thesis). Art Univercity of Isfahan, Faculity of Conservation and Restoration, Isfahan, Iran [In Persian]

Eskandari, A., Hijazi, M., Ozbolt, J., & Hashemi, M. (2019). *Characteristics of Persian Historical and New Adobe Bricks.* (Unpublished Bachelor's Thesis). Univercity of Isfahan, Faculty of Civil Engineering and Transportation, Isfahan, Iran. [In Persian]

Emami, M. (2019). *Material science in archeology and archaeometry*. Esfahan: Academic Center for Education, Culture and Research. [In Persian]

Falahfar, S. (1999). Glossary of traditional Iranian architectural terms. Tehran: Kamyab Publications. First edition [In Persian]

Hadian Dehkordi, M. (2015). Geological studies of Historical and ancient adobe materials in different regions of Iran. Athar Journal, No. 75: 85-96 [In Persian]

Heyidari, D., Younesi, H., & Vatankhah, G. (2013). An Investigation of Historical Lime Mortars (Saruj). Maremat and Memari-e iran. 3(5): 83-96 [In Persian]

Hosseini Keshtan, S. R., Emami, M. A., & Zamanifard, A. (2018). *Resistant Adobe in the face of Descending Moisture by using Zeolite for Conservation Approach in Historical Building (Case study is the Bilqis Historical City of Esfarayen).* (Unpubpished doctoral Thesis). Art Univercity of Isfahan, Faculity of Conservation and Restoration, Isfahan, Iran [In Persian]

Hole, F., Flannery, K. V., & Neely, j. (1969). Pregistory and Human Ecology of the Deh Luran Plain: An Early Village Sequence from Khuzistan, Iran. Library University Pennsylvania.

Malek Shahmirzadi, S. (2003). Prehistoric of Iran. Tehran: Research Deputy of Cultural Heritage Organization, first edition [In Persian]

Matthews, R., Mohammadifar, Y., Matthews, W., & Motarjem, A. (2010). Investigation the Early Neolithc of western Iran. In book: Neolithic of Iran. Archaeological Project (CZAP). Antiquity, Vol 084. Pp. 14-34

Pedram, B., & Ebrahimi, A. (2016). Structural and Physical Characteristics of the Adobe Bricks Used at the World Heritage Site of Arg-e Bam. Archaeometry: 3(2): 81-102. [In Persian]

Rafiei Sareshki, B., Ranjbar, A. M., & Rafizadeh, N. (2004). Mehrazi culture (architecture) of Iran. Iran Road, Housing and Urban Development Research Center, first edition, p.362 Iran Road, Housing and Urban Development Research Center, first edition, pp.362. [In persian].

Ripepi, G. (2020). Mudbricks and Modular Architecture at Tell es-Sultan from the Neolithic to the Bronze age, In book: Digging up Jericho. Archaeopress, pp. 215-229.

Seminsky, L. (2013). *The Shear Strenght of Granular Materials with Dispersed and Non-Dispersed Oversize Particles* (Unpublished Master's Thesis), University of Pittsburgh.

Smith, P. (1991). Architectural innovation and Experientation at Ganj Dare, Iran. In book: World Archeology, 21(3): 323-335.

Stordeur, D., & Ilbanez, J. J. (2008). Stratigraphie et repartition des architectures de Mureybe. In book: Le Site neolithique de Tell Mureybet (Syrie de nord), BAR Internation, Series 1834 (I), Vol 1. pp. 33-94

ابراهیمی، افشین. (۱۳۹۳). امکان‌سنجی بهره‌برداری از فرآورده‌های بوم‌آورد در بهینه‌سازی مصالح مرمتی؛ نمونهٔ مطالعه شده: زیگورات چغازنبیل. نشریه علمی پژوهشی اثر، شماره ۶۵: ۳-۲۲.

ابراهیمی، افشین؛ امین‌امامی، سیدمحمد و پدرام، بهنام. (۱۳۹۸). *ملات گلی غنی شده و خشت‌های نوین ارتقاء یافته با فرآورده‌های بوم آورد برای اقدامات حفاظتی ارگ بم* (رساله دکتری، منتشر نشده). دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان. اصفهان. ایران.

اسکندری، آرش؛ حجازی، مهرداد؛ اوژبولت، جوشکو و هاشمی، محمود. (۱۳۹۹). *تعیین خصوصیات خشت‌های تاریخی و جدید ایران* (پایان‌نامه کارشناسی، منتشر نشده). دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان. اصفهان. ایران.

امامی، محمدامین. علم مواد در باستان شناسی و باستان‌سنجی. اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی.

بازیار، محمدحسن و صالح‌زاده، حسین. (۱۳۹۱). آزمایشگاه مکانیک خاک. دانشگاه علم و صنعت ایران.

پدرام، بهنام و ابراهیمی، افشین. (۱۳۹۶). بررسی خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خشت‌های به کار رفته در محوطه میراث جهانی ارگ بم. پژوهه باستان‌سنجی، ۳(۲): ۸۱-۱۰۲.

حسینی‌کشتان، سیدرضا؛ امامی، محمدامین و زمانی‌فرد، علی. (۱۳۹۸). *خشت مقاوم در برابر رطوبت نزولی با استفاده از زئولیت در رویکرد حفاظت از بناهای تاریخی (مطالعه موردی شهر تاریخی بلقیس اسفراین)*. (رساله دکتری منتشر نشده). دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان. اصفهان. ایران.

حیدری، داریوش؛ یونسی، حامد و وطن‌خواه، غلامرضا. (۱۳۹۲). پژوهشی در ملات‌های آهکی تاریخی (ساروج). نمونه موردی: حمام شاهزاده‌ها در اصفهان. فصلنامه علمی پژوهشی مرمت و معماری ایران. شماره ۵: ۸۳-۹۸.

داس، براجا ام. (۱۳۹۱). اصول مهندسی خاک (مکانیک خاک) ترجمه حسین صالح‌زاده. تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت (انتشار اصلی اثر: ۱۳۸۴).

رفیعی‌سرشکی، بیژن؛ رنجبر، علی‌محمد و رفیع‌زاده، ندا. (۱۳۸۳). فرهنگ مهرازی (معماری) ایران. تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی چاپ اول، صص:۳۶۲.

فلاح‌فر، سعید. (۱۳۷۸). فرهنگ واژه‌های معماری سنت ایران. تهران: نشر کامیاب. چاپ اول.

ملک‌شهمیرزادی، صادق. (۱۳۸۲). ایران در پیش از تاریخ. تهران: معاونت پژوهشی سازمان میراث فرهنگی، چاپ اول.

هادیان دهکردی، منیژه. (۱۳۹۵). مطالعات خاک شناسی مصالح خشتی تاریخی و باستانی در مناطق مختلف ایران. نشریه علمی پژوهشی اثر، شماره ۷۵: ۸۵-۹۶.