نشریه علمی – پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ویژه ۴، سال ۱۳۹۹، صفحه ۱۳۲ تا ۱۵۱

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی – پژوهشی)

www.jsce.ir

تأثیر تثبیت مکانیکی و اصلاح دانه‌بندی خاک بر مقاومت فشاری خشت؛ تجربه‌ای برای بهبود رفتار فیزیکی خشت در منطقه اردکان یزد

منصوره درمحمدی[۱]، محسن فتوحی اردکانی[۲]، رضا رحیم‌نیا[۳]

۱- کارشناسی ارشد، مدرس مدعو گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه

۲- کارشناس فنی پایگاه میراث فرهنگی بافت تاریخی اردکان،

۳- استادیار گروه مرمت و احیا بناهای تاریخی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

چکیده

سرزمین ایران دارای آثار باارزش تاریخی با کالبدی گلین و سابقه‌ای درخشان در استفاده از خشت می‌باشد؛ به همین سبب طی چند دهه گذشته گرایش‌هایی روزافزون به خشت به‌عنوان یکی از شیوه‌های معماری با خاک، در قالب مطالعه آثار گذشتگان (حفاظت) و فعالیت‌های اجرایی (معماری معاصر) با رویکرد مطالعات آزمایشگاهی شکل گرفته است. این مسئله تمایل برای بهبود و ارتقا ویژگی‌های آنچه در جهان گذشته وجود داشته را نشان می‌دهد. در این راستا، پژوهش حاضر با فرضیه امکان بهبود خواص مکانیکی خشت از طریق شناخت و اصلاح خاک آغاز گردیده و هدف خود را بر روی بررسی تأثیر اصلاح دانه‌بندی خاک بر مقاومت فشاری خشت به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در پایداری سازه‌های گلین متمرکز کرده است. لذا با اتکا به تجربیات معماران بومی شهرستان اردکان یزد و بهره‌گیری از دانش روز، ۶ معدن خاک سنتی اردکان گزینش و مشخصات فیزیکی خاک‌ها برای آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس از یک نمونه ماسه اصلاح‌شده به‌منظور اصلاح دانه‌بندی خاک تمامی معادن استفاده شد و نمودار دانه‌بندی خاک معادن براساس نمودار هارمونی دانه-بندی خشت اصلاح گردید. در مرحله بعدی، نمونه‌های فشاری به روش سنتی، روش توأم با تثبیت مکانیکی (کوبش) و همچنین روش تثبیت مکانیکی و فیزیکی (اصلاح دانه‌بندی و افزودن ماسه اصلاح‌شده به خاک به میزان ۱۰ ٪، ۲۰ ٪ و ۳۰ ٪) ساخته شده و نهایتاً مقاومت فشاری آن‌ها، مورد آزمون و تحلیل قرار گرفته است. این مطالعه در قالب یک پژوهش کمی و به شیوه تجربی انجام شده که مبتنی بر مطالعات میدانی، بررسی‌های محیطی و روش‌های تجربی- آزمایشگاهی بوده است.نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری بیانگر بهبود مقاومت فشاری در خشت‌های ساخته شده از خاک ۴ معدن به روش تثبیت مکانیکی و بدون افزودنی در مقایسه با خشت‌های سنتی و خشت‌های اصلاح‌شده با ماسه است. نمونه‌های ساخته شده با خاک ۲ معدن دیگر نیز بیشترین مقاومت را در حالت تثبیت‌شده مکانیکی با میزان ۱۰ ٪ ماسه اصلاح‌شده یا به عبارتی کمترین میزان افزودنی داشته‌اند. به طور کلی می‌توان این‌گونه استدلال نمود که در نمونه خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش، تثبیت مکانیکی و اعمال تراکم به خاک تأثیر مطلوب‌تری نسبت به تثبیت فیزیکی و اصلاح دانه‌بندی خاک‌ها داشته است، چرا که در اغلب موارد، خاک مورد استفاده برای خشت دارای حجم قابل‌توجهی ریزدانه و به ویژه رس است که پیوستگی میان ذرات خاک را تضمین می‌کند اما در این بررسی، افزودن ماسه موجب کم شدن انسجام خشت و کاهش مقاومت فشاری آن شده است.

کلمات کلیدی: خشت تثبیت‌شده، اصلاح دانه بندی، ماسه اصلاح‌شده، مقاومت فشاری، معماری و حفاظت.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2019.144314.1638
۱۳۹۷/۰۵/۲۳	۱۳۹۷/۱۰/۰۵	۱۳۹۷/۱۱/۱۴	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	doi: 10.22065/JSCE.2019.144314.1638

*نویسنده مسئول: رضا رحیم نیا

پست الکترونیکی: Rahimnia@arc.ikiu.ac.ir

The Effect of Mechanical Stabilization and Improving Soil Gradation on the Compressive Strength of Adobe: A Case Experiment for Improving Adobe's Physical Behavior in the Ardakan Region, Iran

Mansoure Dormohamadi [1] , Mohsen Fotuhi Ardakani [2] ,Reza Rahimnia [3*]

1 Assistant Professor of the Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran
2 Ph.D. Candidate of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran
3 3 Assistant Professor, Conservation of historic building Department, Faculty of architecture and urban development, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

ABSTRACT

As a country with lots of historical monuments built on earthen structures, Iran has a brilliant background in using adobes as a building material; a fact which has recently brought with it a return to this kind of architecture in spite of the decreasing use of soil architecture in the last few decades. So improving and optimizing clayey materials has been considered an appropriate way to defy the decline of this kind of architecture and revive it, and also to protect the invaluable heritage of soil architecture.This study begins with the presupposition that the mechanical properties of adobe can be improved through understanding soil, and aims at understanding how the improvement of soil gradation affects adobe's compressive strength as an effective parameter in the stability of clayey buildings. So six mines of Ardakan's traditional soil (which had been used since the old times in making adobes and is endorsed by Ardakan's masons) are selected based on the experience of the city's native architects; then the compressive samples are made through both the traditional method and also using more recent methods of mechanical stabilization emphasizing on physical stabilization (i.e. improving soil gradation and adding improved sand to the soil), and finally the samples are tested and analyzed. In this study, a sample of improved sand is used to improve the gradation of all the mines' soils, and the results of the tests for compressive strength imply the improvement of this parameter in the adobes made of these soils in comparison with those made through traditional methods. Furthermore, adding different percentages of sand results in a decrease or fluctuation in adobe's compressive strength; so one can claim that in order to improve the compressive strength of the resulting adobe, in addition to mechanical stabilization, one should also try improving soil gradation.

ARTICLE INFO

Received: 14 August 2018
Revised: 26 December 2018
Accepted: 03 February 2019

Keywords:
Stabilized adobe, Improving gradation, Improved soil, Compressive strength, Architecture and Conservation

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.144314.1638

*Corresponding author: Reza Rahimnia
Email address: Rahimnia@arc.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

تقریباً در تمام اقلیم‌های گرم‌وخشک و معتدل جهان، خاک رایج‌ترین مصالح ساختمانی بوده است اما استفاده از خاک در ساختارهای معماری تنها به مردمان باستان محدود نبوده بلکه امروزه نیز کاربردهای روزافزونی پیدا کرده است [1]. بازآفرینی معماری خاکی، راهبردی است که می‌تواند هزینه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی کمتری در مقایسه با بسیاری از روش‌های متداول معماری حال حاضر داشته باشد لذا علاقه و تمایل به مطالعه و حفاظت معماری خاکی در نیمه‌ی قرن گذشته بروز پیدا کرد [2]. این تمایل و حتی ضرورت، چه در قالب بهبود خواص خاک و خشت به‌منظور کاربرد در معماری معاصر و چه در قالب بهره از آن در حفاظت از میراث معماری، موردتوجه بوده و تلاش شده با روش‌های متفاوت، نواقص موجود در خشت و معماری خاکی بهبود یابند. نتایج حاصله از توصیف تجربیات جهانی در ارتقاء ساخت‌وساز گلین، نه‌تنها قابلیت احیا این میراث ارزشمند بومی را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است بلکه در صورت اصلاح و بهبود خواص مصالح گلین، نمایانگر امکان کاربست این فناوری در تلفیق با آموزه‌ها و تجربیات معماری بومی و همگامی الزامات فنی روز به‌منظور تأمین موجبات بازتولید معماری گلین، مرمت آثار تاریخی و پاسخگویی به نیازهای انسان معاصر می‌باشد.

روش‌های بهبود مقاومت و استحکام طبیعی خاک که عموماً بنام "تثبیت خاک" از آن یاد می‌شود در بسیاری از کشورها به مورد اجرا گذاشته شده‌اند. این روش‌ها چندان جدید هم نیستند [3] و استفاده از مواد مختلف جهت بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی مصالح خاکی سابقه‌ای دیرینه دارد؛ در حقیقت هم‌زمان با پیدایش معماری خاکی، بشر روش‌هایی را نیز برای افزایش طول عمر و استحکام این مصالح به کار بست [4]. ارتقاء و استحکام‌بخشی مصالح گلین با به‌کارگیری شیوه‌های گوناگون تثبیت همچون تراکم، کنترل دانه‌بندی یا افزودن تثبیت‌کننده‌های متنوع اعم از آلی یا غیرآلی تأمین می‌شود.

از لحاظ ترکیب مصالح معمولاً دو عامل به طور موازی بر مقاومت و پایداری ساختمان گلین تأثیر می‌گذارند. اولین عامل عبارت است از: وجود یک عامل خودگیری مانند رس یا احتمالاً کلسیت یا ماده‌ای از آن جنس. این مواد می‌توانند از طریق متبلور شدن یا سیلان، چسبندگی در حالت تر و گیردار کردن ذرات خاک به هم، تأثیر عمده‌ای بر کارایی مصالح بگذارند. عامل دوم که می‌تواند به جای اولی به کار رود و بر کارآیی تأثیر بگذارد عبارت است از دانه‌بندی توأم با مواد فعال سطحی طبیعی. در منابع متفاوت، رس مهم‌ترین عامل شناخته شده، اما دانه‌بندی یکنواخت از رس و لای گرفته تا ماسه مهم‌تر بوده و در بسیاری موارد، در صورتی که مصالح مناسب به شکل مستقیم در دسترس نباشد اختلاط با افزودن ماسه تعدیل می‌شود [5]. در این راستا، پژوهش حاضر بر آن است تا با مطالعه رابطه بین دانه‌بندی و مقاومت فشاری حاصل از خشت تثبیت‌شده، بررسی نماید که آیا هماهنگی و یا سطوح معنادار و منطقی در رابطه بین آن‌ها وجود دارد؟

بدین منظور پس از حصول شناخت نسبت به ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند دانه‌بندی و هیدرومتری، لزوم اصلاح دانه‌بندی خاک‌ها تشخیص داده شد. لذا تأثیر این اصلاح بر مقاومت فشاری خشت از طریق افزودن نوعی اختلاط ماسه - با توجه به نمودارهای حاصل از دانه‌بندی خاک‌ها و تطبیق با نمودار هارمونی ارائه‌شده در پژوهش‌های مرکز مطالعات خاک کراتر- و همچنین به‌کارگیری شیوه تثبیت مکانیکی به‌عنوان روش تثبیت ارزان و زیست‌محیطی بررسی شده است. در این راستا، بر مبنای بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی؛ شش نمونه خاک متفاوت از معادن خاک شهرستان اردکان در استان یزد گزینش و دانه‌بندی شده و سپس نمونه‌های آزمایشی در ابعاد ۵*۵*۵ و در پنج گروه متفاوت شامل یک گروه شاهد (بدون اختلاط و با روش ساخت سنتی)، یک گروه بدون اختلاط با روش تثبیت مکانیکی و ۳ گروه ساخته شده با روش تثبیت مکانیکی و اختلاط با ماسه اصلاح‌شده به میزان ۱۰درصد، ۲۰ درصد و ۳۰ درصد، تهیه و آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری بر روی آن‌ها انجام گرفته است. لازم به ذکر است مبنای پژوهش حاضر بر اساس بررسی‌های فیزیکی شکل گرفته و رفتارهای شیمیایی هدف بررسی‌های این پژوهش نبوده است. همچنین در این نوشتار چارچوب کلی پژوهش در راستای پاسخگویی به سؤالات زیر سازمان یافته است:

- اصلاح دانه‌بندی خاک به‌عنوان راهکاری برای بهبود مقاومت فشاری خشت، تا چه حد بر کاهش یا افزایش مقاومت فشاری خشت تأثیر خواهد داشت؟
- چگونه می‌توان از قابلیت‌های تثبیت مکانیکی و فیزیکی در جهت بهبود مقاومت فشاری خشت بهره گرفت؟

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات علمی در زمینهٔ مصالح خشتی در چند دهه اخیر افزایش چشمگیری داشته است. در حدود سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ اولین زمزمه‌های توجه به مطالعه و حفاظت معماری خاکی مشاهده شدند [1]. در سال ۱۹۷۰ کمیته علمی بین‌المللی میراث معماری خاکی[1] توسط ایکوموس ایجاد و برای نخستین بار به‌منظور بررسی مشکلات موجود در جامعه و چگونگی حفاظت از بناهای تاریخی ساخته شده از گِل برنامه‌هایی مورد توجه قرار گرفت. اولین دستاورد این برنامه‌ها، برگزاری دو سمپوزیوم بین‌المللی حفاظت ساختمان‌های گلی در سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۷۶ در ایران بود. سومین سمپوزیوم در سال ۱۹۸۰ در آنکارا برگزار شد و در همین سال گزارش‌های زیادی درباره کارگاه خانه‌های گلی در مناطق لرزه‌خیز در دانشگاه نیومکزیکو ارائه شد [6]. به‌طورکلی و جدا از مباحثی که مشخصاً در ارتباط با موضوع پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد، مطالعات بسیاری اعم از داخلی یا بین‌المللی مرتبط با مصالح خاک و خشت انجام شده و نمونه‌های قابل‌توجهی [۳ و ۱۵- ۷] موجود است که تاریخچه مناسبی برای این زمینه تحقیقاتی به وجود آورده‌اند.

برخی از مؤسسات و بنیادهای بین‌المللی مثل یونسکو[i]، ایکروم[ii]، ایکوموس[iii] نیز حمایت‌کننده در زمینه‌های مختلف معماری گلین بوده و برخی دیگر مثل بخش مطالعات خاک کراتر واقع در گرونوبل فرانسه[iv]، موسسه حفاظت وابسته به بنیاد گتی[v]، آروویل[vi]، بنیاد آقاخان[vii]، مؤسسه کال ارتز[viii]، موسسه ترا کُره[ix]، دانشگاه کاتولیگ پرو[x] و دانشگاه کاسل آلمان[xi] نقش اساسی‌تری داشته و مروج معماری گلین در جهان می‌باشند[xii]. همچنین از دهه ۷۰ میلادی در کشور پرو مطالعات گسترده‌ای در مورد ساختمان‌های خشتی آغاز شده که هدف آن، افزایش مقاومت این بناها در مقابل زلزله بود. این مطالعات شامل انواع مختلف تقویت با استفاده از مصالح محلی و افزودنی‌ها به ملات بود. همان‌گونه که حجازی و همکاران [۱۵] اشاره می‌کنند تا سال ۱۹۷۹ اکثر تحقیقات براساس مطالعه رابطه بین مصالح مصرفی و مقاومت آجرهای خشتی قرار داشت، ولی از آن زمان به بعد، تأثیر خصوصیات خاک بر مقاومت خشت نیز مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش حاضر نیز بررسی یکی از خصوصیات تأثیرگذار خاک بر مقاومت خشت در کنار مقوله تثبیت مورد بحث و توجه است. گفتنی است این پژوهش، بخش مهم دیگری تحت عنوان میزان رس موجود در خاک مناسب برای معماری خاکی را نیز مورد توجه قرار می‌دهد، ازاین‌رو مطالعه پیشینه در قالب دو بخش تثبیت خاک و همچنین ویژگی‌های خاک مناسب برای معماری خاکی مرور شده است.

اظهارات نویسندگان مختلف قویاً اعلام می‌دارند که می‌توان بر معایب ناشی از خاک تثبیت‌نشده با تثبیت‌کنندگی صحیح خاک غلبه کرد. به عبارتی، با اصلاح خاک‌های دارای پایداری کم می‌توان مقاومت و پایداری آن‌ها را در برابر نیروهای فشاری، خمشی و فرسایش افزایش داده و از این خاصیت در ساخت ساختمان‌ها استفاده کرد [16]. بخش عمده‌ای از تحقیقات در مورد تثبیت‌کنندگی در سه دهه بعد از جنگ جهانی دوم انجام شد اما علی‌رغم تحقیقات بسیار، همچنان تثبیت خاک علمی، دقیق و کامل نیست. محققان در حدود ۱۳۰ تثبیت‌کننده مختلف ازجمله سیمان، آهک و قیر شناسایی کرده‌اند ولی هیچ تثبیت‌کننده معجزه‌آسایی که بتواند همواره مورد استفاده قرار بگیرد وجود ندارد [17]. تثبیت‌کنندگی عموماً با عناوین تثبیت فیزیکی و شیمیایی معرفی شده در حالیکه تعریف Guillaud & Houben (۱۹۹۴) از فرآیند تثبیت‌کنندگی خاک نشان می‌دهد که صرفاً افزودن تثبیت‌کننده به معنی تثبیت خاک نیست بلکه کوبیدن نیز به تنهایی می‌تواند خاک را تثبیت کند. به عبارتی، تراکم و کوبش نیز نوعی تثبیت خاک محسوب شده و تحت عنوان تثبیت مکانیکی شناخته می‌شود. این شیوه تثبیت، به دلیل مصرف کم انرژی تمام‌شده، حداقل تأثیر بر روی محیط‌زیست و قابلیت ارائه محیطی راحت‌تر برای فرد ساکن را دارا است.

در پژوهش حاضر نیز از دو شیوه تثبیت خاک بهره گرفته است: تثبیت فیزیکی (اصلاح دانه‌بندی) و تثبیت مکانیکی (کوبش). لازم به ذکر است ازآنجایی‌که همخوانی با اصول زیست‌محیطی به‌عنوان یکی از اهداف حاکم بر روند پژوهش بوده، ماسه اصلاح‌شده به‌عنوان عامل تثبیت‌کننده فیزیکی در نظر گرفته شد. در پژوهش تقریباً مشابهی که توسط Shariful Islam و Iwashita (۲۰۰۶) انجام شده، با هدف اصلاح ضعف ساختمان‌های خشتی در مقابل زلزله از افزودنی‌هایی همچون الیاف طبیعی (کنف، پشم/ Jute، کاه) و سیمان به‌عنوان مصالح تقویت‌کننده استفاده شده است. در این راستا، رس (Acadama)، ماسه (Toyuna) و بنتونیت را با نسبت‌های وزنی ۲/۵، ۱، ۰/۶ مخلوط کرده و مخلوط حاصل را "اختلاط خاک- ماسه" نامیدند. آن‌ها سعی کرده بودند دانه‌بندی این اختلاط به دانه‌بندی خاک موجود در

[1]. International Committee on Earthen Architectural Heritage (ISCEAH)

نمونه‌های خشتی که از بناهای تاریخی ایران و بنگلادش تهیه کرده بودند، نزدیک شود [18]. نتایج بیانگر امکان بهبود مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌های خشتی در صورت استفاده از ٪۲ جوت یا ترکیب جوت و سیمان بوده است.

بحث قابل‌توجه دیگر، شرایط و ویژگی‌های خاک مناسب برای معماری خاکی است که به‌گونه‌ای ارتباط مستقیم با این پژوهش خواهد داشت. در برخی منابع بیان شده که خاک مناسب برای خشت‌سازی در دسته خاک‌های ماسه‌ای لومی، لوم ماسه‌ای یا لوم رسی-ماسه‌ای قرار می‌گیرد که درصد رس بین صفر تا ۳۰ درصد را دارا می‌باشند [19]. همچنین در تجارب بیان‌شده، دانه‌بندی مناسب را یک-سوم تا دوسوم شن و ماسه، یک‌چهارم لای و یک‌پنجم تا یک‌دهم وزنی رس دانسته‌اند [5] و مقدار لای که هیچ‌گونه خاصیت چسبندگی ندارد بایستی کمتر از ٪۲۰ حجم کل مخلوط خاک باشد [20]. به‌طورکلی، مصالح خاکی باید به میزان کافی حاوی درشت‌دانه‌ها باشند تا انقباض آن‌ها به حداقل برسد. اما هم‌زمان، میزان رس آن‌ها باید به حدی باشد تا نیروی پیوستگی، امکان استفاده از آن‌ها را فراهم سازد [21].

رس به‌عنوان یکی از ویژگی‌های بسیار مهم خاک و عامل انسجام و ضدآبی دیوار، می‌تواند هم جزء جادویی و هم جزء مشکل‌ساز مصالح گلین باشد [22] . براساس پژوهش انجام شده توسط رحیم‌نیا و حیدری‌بنی (۱۳۹۰)، افزایش دامنه خمیری (PI) در خاک‌های مناسب جهت خشت‌زنی، حاکی از چسبندگی زیاد خاک به دلیل وجود ذرات رسی بیشتر در آن می‌باشد و درنتیجه، میزان مقاومت مکانیکی خشت حاصل در حالت معمولی نیز افزایش خواهد یافت. همچنین میزان رس خاک در منابع مختلف با مقادیر گوناگونی من‌جمله ۳٪ تا ۲۰٪ [5]، ۵٪ تا ۵۰٪ [۲۲]، تقریباً $\frac{1}{3}$ مواد تشکیل‌دهنده و بین ۱۵٪ تا ۳۰٪ [۱۹]، بین ۳۰٪ تا ۷۰٪ [۲۳]، ۲۵٪ تا ۴۵٪ [24] و ۲۰٪ تا ۷۰٪ با مقدار بهینه پیشنهادی بین ۳۰٪ تا ۴۰٪ [20] ذکر شده است که میانگین درصد برای رس بین ۱۸٪ تا ۴۲٪ برای خاک مناسب برای خشت متغیر بوده است. قابل‌توجه است که محدوده خاک مناسب برای تولید خشت در شکل شماره ۱، با این اعداد دارای تطابق زیادی است.

۳- روش پژوهش

جامعه آماری پژوهش به شهرستان اردکان واقع در استان یزد پرداخته که با بیش از ۷۰۰ سال تاریخ معماری [xiii]، دارای تعداد فراوانی بنای خشتی باارزش و تاریخی است و جهت حفاظت و گاه مرمت این بناها از مصالح خشتی ساخته‌شده از خاک اردکان استفاده می‌گردد. در تحقیق حاضر، هدف اصلی این بوده است که مشخصات مکانیکی خشت‌های ساخته‌شده از معادن خاک اردکان بررسی شده و در صورت امکان، راهکاری برای بهبود آن ارائه گردد تا بدین وسیله حفاظت و مرمت بناهای خشتی اردکان بـهبود و همچنین در ساخت بناهای معاصر گلین نیز مورد استفاده قرار گیرد.

پژوهش حاضر به روش تجربی، مبتنی بر مطالعات میدانی، بررسی‌های محیطی و مطالعات آزمایشگاهی بر روی خاک و خشت به‌منظور تأکید بر اهمیت دانه‌بندی خاک و تأثیر آن بر خواص مکانیکی به‌ویژه مقاومت فشاری خشت انجام شده است. برای این منظور پس از مطالعه کتابخانه‌ای و بررسی میدانی خاک مناطق مختلف شهرستان اردکان و حومه آن و همچنین مشورت با پژوهشگران مرتبط، پیشکسوتان معماری خشتی[xiv] و پایگاه پژوهشی میراث فرهنگی اردکان، از خاک ۶ منطقه مختلف در اطراف اردکان (عیش‌آباد، محمدآباد، حسین‌آباد، قطب‌آباد، علی‌آباد و زردگ) که از قدیم‌الایام برای خشت‌زنی استفاده شده و مطالعات و مشاهدات بصری نیز کیفیت آن‌ها را برای تهیه مصالح خاکی تأیید می‌نمود، به‌طور تصادفی نمونه‌برداری شد. قابل ذکر است که در ادامه این مطالعه مطابق آنچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، از کدهای اختصاری با حرف S (مخفف Soil) و اندیس حرف اول نام هر معدن، به جای نام کامل معدن خاک استفاده شده است.

جدول۱: مشخصات محلی معادن خاک موردنظر در پژوهش، مأخذ: پژوهشگران

منطقه نمونه‌برداری		مشخصات محلی منطقه
عیش‌آباد	S_E	منطقه عیش‌آباد، حسین‌آباد و محمدآباد سه منطقه‌ای است که در شمال اردکان و شمال شرقی شهر احمدآباد و در فاصله نزدیکی از یکدیگر واقع شده‌اند. این مناطق در دوران گذشته به مزارع کشاورزی اختصاص داشته است. همچنین در حدفاصل منطقه حسین‌آباد و عیش‌آباد، بقایایی از قلعه‌ای تاریخی وجود دارد لذا این قبیل شواهد معماری در منطقه حاکی از آن است که خاک منطقه برای برپایی ساختمان‌های خشتی مناسب تشخیص داده شده است. خاک اطراف عیش‌آباد تا حدفاصل زردگ دارای میزان زیادی نمک و آهک می‌باشد[xv].
محمدآباد	S_M	
حسین‌آباد	S_H	
قطب‌آباد	S_{GH}	قطب‌آباد یکی از مزارع قدیم اردکان است که در شرق بافت قدیم واقع شده و امروزه یکی از مناطق مسکونی اردکان محسوب می‌گردد [۲۵].
علی‌آباد	S_A	این مزرعه در منتهی‌الیه اراضی شمالی محدوده خارج از حصار اردکان واقع شده است [۲۵].
زردگ	S_Z	زردگ در ۱۰ کیلومتری شمال شهر اردکان قرار دارد و دارای آثار تاریخی بسیاری همچون آب‌انبار، قلعه، مسجد، بازار و خانه‌های بسیاری بوده که بعضی تخریب شده و بعضی موجود می باشد [۲۶].

سپس مطابق با استانداردهای بین‌المللی انجمن مواد و آزمون آمریکا [xvi] ، مطالعات آزمایشگاهی برای شناخت ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های خاک با آزمون‌هایی همچون آزمایش دانه‌بندی خاک (استفاده از الک و هیدرومتری، کد استاندارد: D422-87 ASTM) و آزمون تعیین درصد رطوبت خاک (روش خشک کردن در آون، کد استاندارد: D4643-00 ASTM) انجام شد و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. پس از تحلیل منحنی دانه‌بندی خاک‌ها و تطبیق نتایج دانه‌بندی با نمودار هارمونی خاک، بنای کار بر اصلاح دانه‌بندی تمامی ۶ گروه خاک نمونه گذاشته شد. لذا طرح اختلاطی شامل لای، ماسه و شن تحت عنوان ماسه اصلاح‌شده برای افزودن به خاک و اصلاح دانه‌بندی در نظر گرفته شد. ۱ گروه شاهد (روش ساخت سنتی) و ۱ گروه آزمایشی با روش تثبیت مکانیکی و ۳ گروه آزمایشی با درصد اختلاط ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ ماسه اصلاح‌شده به ازای هر معدن خاک شکل گرفت که در هر گروه ۳ نمونه خشتی (نمونه فشاری) ساخته‌شده و مقاومت فشاری نمونه‌های تولیدشده مورد سنجش و تحلیل قرار گرفت. قابل‌ذکر است که یکی از دغدغه‌های مهم این پژوهش، عدم وجود استانداردهای موردنیاز در حوزه معماری گلین در ایران اعم از شناخت خاک، ساخت خشت، عمل‌آوری (دوره خواب) و ... بوده است؛ لذا اصلاح خاک معادن و ساخت نمونه‌ها با بهره‌گیری از تلفیق استانداردهای موجود و دانش معماری سنتی، به‌طور یکسان صورت گرفته و میزان ماسه اصلاح‌شده به‌عنوان شاخص و متغیر مستقل بین نمونه‌ها موردمطالعه و بررسی قرار گرفته است. همچنین در تثبیت نمونه‌ها از هیچ‌گونه افزودنی شیمیایی استفاده نشده است. طرح پیش‌آزمون- پس‌آزمون نیز برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده و به همین دلیل مقاومت فشاری ابتدا بر روی نمونه‌های بدون افزودنی به دو روش ساخت سنتی و تثبیت‌شده و پس از آن بر روی نمونه‌های با افزودن ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ ماسه اصلاح‌شده مطالعه شده‌اند.

۴- ابزار پژوهش و ویژگی آن (اعتبار و روایی)

در این پژوهش، استفاده از آزمایش‌های تعیین دانه‌بندی به روش الک مرطوب، آزمون هیدرومتری، درصد رطوبت، تعیین چگالی خاک [27] و مقاومت فشاری [4] بر روی نمونه‌های ساخته‌شده موردتوجه بوده است. جهت اطمینان از روایی بودن روش و ابزار جمع‌آوری اطلاعات با متخصصین ذی‌ربط (متخصصین معماری با خاک از مرکز مطالعات خاک کراتر واقع در دانشگاه گرونوبل فرانسه، متخصصین مرمت بنا در پایگاه پژوهشی میراث فرهنگی بافت تاریخی اردکان و کارشناسان آزمایشگاه فنی‌ومکانیک خاک آزماپویان- اردکان) بحث و تمامی مراحل اعم از انتخاب معادن خاک تا آزمایش‌ها و اقدامات انجام شده تحت مشورت آن‌ها صورت پذیرفته است. همچنین برای جلوگیری از اشتباهات احتمالی در آزمون فشاری، ۳ نمونه تحت آزمون قرار گرفته، قابل‌ذکر است که نمونه‌ای با اختلاف فاحش در مقدار مقاومت فشاری نسبت به دو نمونه دیگر، حذف شده و میانگین دو نمونه دیگر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. درباره اعتبار روش نیز به دلیل منابع خطای موجود، بعضی نمونه‌ها که دچار معایبی همچون ترک یا شکست غیرقابل‌توجیهی شده بودند مجدداً ساخته شده و آزمایش بر روی آن‌ها مجدداً انجام پذیرفته است.

۵- مطالعات آزمایشگاهی (روش اجرای پژوهش)

شناسایی خواصی از خاک همچون دانه‌بندی و آگاهی نسبی به میزان هریک از دانه‌ها برای تولید فرآورده خاکی باکیفیت ضروری است [28]، چرا که بسیاری از خواص مکانیکی و فیزیکی خاک‌ها تابعی از جنس، شکل، اندازه و چگونگی توزیع اندازه دانه‌ها است [29]. برای تولید بلوک خاکی تثبیت‌شده، خشت و دیگر مصالح گلین، خاک با دانه‌بندی مناسب به‌منظور کاهش حجم حفره‌های هوا در ماتریس خاک موردنیاز است [30]. دردانه‌بندی خاک‌های مخلوط درشت‌دانه و ریزدانه، برای بخش درشت‌تر از الک ۲۰۰ با آزمایش دانه‌بندی با الک و برای ریزتر از آن با استفاده از آزمایش هیدرومتری انجام می‌شود؛ برای خاک‌های چسبنده و ریزدانه نیز حتماً باید از دانه‌بندی به روش الک مرطوب استفاده شود [29] تا تشخیص صحیحی از ساختار خاک فراهم گردد.

۵-۱- دانه‌بندی خاک

با این مقدمه، در پژوهش پیش‌رو ابتدا از خاک‌های ۶ معدن نامبرده واقع در شهرستان اردکان نمونه‌برداری شده است و ازآنجایی‌که معادن نام‌برده از قدیم مورداستفاده برای خشت‌زنی بوده‌اند، با اتکا به اظهارات معماران سنتی اردکان و شناخت اولیه نسبت به معادن خاک، در گروه خاک‌های ریزدانه دسته‌بندی شدند. از طرفی، با توجه به پیشینه پژوهش حاضر در اردکان و تصمیم مرکز مطالعات خاک کراتر بر بررسی خاک‌های اطراف اردکان و تعیین خاک مناسب برای تولید خشت در این شهرستان، بنای کار بر به‌کارگیری روش کار مرکز مطالعات خاک کراتر [۱۰، 27 و 31]، گذاشته شد و تعیین دانه‌بندی به روش الک مرطوب با الک‌های شماره $^{3}/_{4}$، $^{3}/_{8}$، ۴، ۱۰، ۱۸، ۴۰، ۷۰ و ۱۴۰ برای هرکدام از نمونه‌های خاک انجام شد [xvi i]. با توجه به نتایج اولیه حاصل از آزمایش نمونه‌ها با الک مرطوب (جدول ۲) و عبور درصد بالایی از ذرات خاک از الک شماره ۱۴۰، جهت تکمیل دانه‌بندی خاک در محدوده ریزدانه و دستیابی به نمودار صحیح دانه‌بندی، نیاز به آزمایش هیدرومتری نیز (جدول ۳) موردتوجه قرار گرفت. درنهایت نتایج حاصل از نمودار دانه‌بندی خاک‌ها ترسیم و در شکل ۱ ارائه شده است.

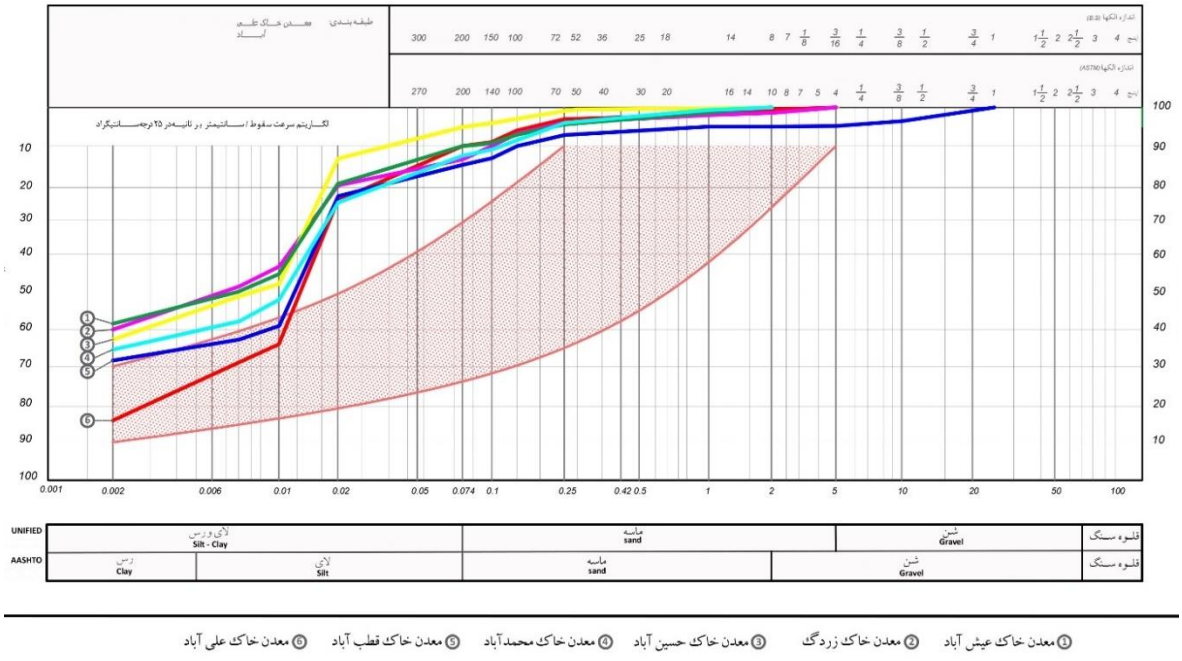
جدول۲ : نتایج دانه‌بندی خاک معادن به روش الک مرطوب، مأخذ: پژوهشگران

شماره الک / نام منطقه	$^{3}/_{4}$	$^{3}/_{8}$	۴	۱۰	۱۸	۴۰	۷۰	۱۴۰	زیرالک
S_E	-	٪۰.۲۸	٪۰.۰۳	٪۰.۱۵	٪۰.۵	٪۱.۵۸	٪۲.۵۷	٪۵.۰۶	٪۸۶.۰۵
S_M	-	-	٪۰.۱	٪۰.۱۴	٪۰.۴۸	٪۱.۶۵	٪۳.۵	٪۷.۴	٪۷۹.۶
S_H	-	-	-	٪۰.۲۲	٪۰.۱۳	٪۰.۴	٪۰.۸۸	٪۳.۳۸	٪۸۹.۶
S_{GH}	٪۰.۸۱	٪۲.۲	٪۱.۲	٪۰.۳۷	٪۰.۱۱	٪۱.۲۵	٪۲.۴۹	٪۵.۱۲	٪۸۶.۴۵
S_A	-	-	٪۰.۱۳۶	٪۰.۱۸	٪۰.۳۵۶	٪۰.۷۶۴	٪۱.۳۴۸	٪۷.۴۹۲	٪۸۵.۰۸
S_Z	-	٪۰.۰۶	٪۰.۰۳۶	٪۰.۲۹۶	٪۰.۴۸۸	٪۱.۰۹۲	٪۲.۶۰۴	٪۷.۲۷۶	٪۸۵.۲۲

جدول۳ : نتایج توزیع دانه‌ها حاصل از آزمون هیدرومتری، مأخذ: پژوهشگران

نام منطقه	قلوه‌سنگ	شن	ماسه	سیلت/لای	رس
S_E	-	۰/۳	۹/۹	۵۱/۹	۳۷/۹
S_M	-	-	۱۲/۸	۵۵/۸	۳۱/۴
S_H	-	-	۴/۶	۶۰/۷	۳۴/۷
S_{GH}	-	۴/۲	۹/۳	۵۷/۴	۲۹
S_A	-	۰/۱	۱۰/۱	۷۹/۷	۱۰
S_Z	-	۰/۱	۱۱/۸	۵۲/۵	۳۵/۶

موضوع قابل‌بحث دیگر در این پژوهش، محدوده هارمونی خاک مناسب برای ساخت خشت است. مرکز مطالعات خاک کراتر در پژوهش‌های مختلفی که توسط این مرکز انجام شده [۱۰،۳۱،۳۲،۳۳،۳۴] از نمودار هارمونی جهت اصلاح دانه‌بندی خاک استفاده کرده است. این نمودار که محدوده مطلوب دانه‌بندی در آن مشخص و ارائه‌شده برای سه موضوع: خشت [xviii]، بلوک خاک فشرده[xix] و دیوار خاک کوبیده[xx] تهیه شده و به‌عنوان مرجعی برای انتخاب خاک شناخته می‌شود. لذا با توجه به منابع موجود، محدوده موردنظر برای خاک مناسب جهت تولید خشت، استخراج و موردتوجه قرار گرفت. این محدوده هارمونی در شکل ۱ با رنگ قرمز مشخص شده است. گفتنی است محدوده هارمونی در نمودار مذکور از مطالعات انجام‌شده توسط هوبن و همکارانش استخراج شده که در کتاب مستخرج از مطالعات ایشان [۱۰] مفصلاً به آن پرداخته شده است. در این نمودار، توزیع بهینه ذرات با اندازه‌های گوناگون، به‌صورتی ارائه‌شده که مابین دو منحنی دیگر قرار می‌گیرد؛ دو منحنی مذکور حد بالا و پایین تلورانس را نشان می‌دهد. به‌منظور دستیابی به توزیع بهینه ذرات، منحنی توزیع دانه‌بندی باید در محدوده تلورانس قرار گیرد [۳۱]. قابل‌ذکر است که ناحیه هاشور زده، صرفاً یک راهنما برای کاربر است و نه دستورالعملی که لزوماً باید رعایت شود [۳۲] و اگرچه شناخت نسبت به میزان هریک از دانه‌ها یک شاخص مهم است اما برای انتخاب خاک کافی نیست [۳۲]. به‌طورکلی، بسیاری از خاک‌هایی که خارج از محدوده پیشنهادی قرار می‌گیرند نیز می‌توانند در عمل، نتایج قابل قبولی به دست آورند [۳۲] اما پیشنهاد می‌شود مجموعه‌ای از آزمون‌ها روی این دسته خاک‌ها انجام شود تا مطلوبیت خاک مورد ارزیابی دقیقی قرار گیرد [۳۳]. از طرف دیگر، خاک‌هایی که با محدوده پیشنهادی مطابقت دارند، در اکثر موارد، نتایج مطلوبی را ارائه خواهند داد [۳۲].



شکل۱ : نمودار دانه‌بندی خاک‌ها، مأخذ: پژوهشگران

۵-۲- آماده‌سازی خاک اصلاح‌شده

بررسی اولیه نمودارهای دانه‌بندی نشان می‌دهد خاک‌های برداشت‌شده در محدوده هارمونی قرار ندارند (جز بخش محدودی از خاک قطب‌آباد و علی‌آباد که در محدوده هارمونی است)، ازاین‌رو تلاش شده است در جهت نزدیک شدن خاک‌ها به محدوده هارمونی اصلاحاتی صورت گیرد. براساس آنچه در بخش پیشینه پژوهش در مورد درصد دانه‌بندی خاک مناسب برای خشت ارائه شد، نتیجه گرفته شد که میانگین درصد برای رس بین ۱۸٪ تا ۴۲٪ متغیر است؛ درحالی‌که در خاک معادن انتخاب‌شده، درصد زیادی از خاک به زیرالک ۱۴۰ (به‌طور میانگین، بیش از ۸۵٪) اختصاص داده شده که نمایانگر میزان رس بالا و چسبندگی بسیار زیاد خاک‌ها می‌باشد لذا بیانگر لزوم

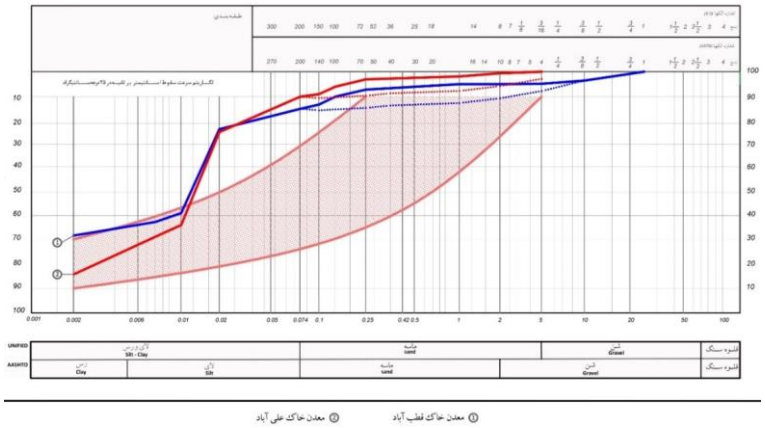
به‌کارگیری ملاحظاتی در اصلاح خاک مناسب برای تولید خشت می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد حداقل در بخش ماسه باید مقدار بیشتری از دانه‌ها به ترکیب افزوده شوند.

اساساً نوع خاک موجود در هر منطقه تعیین‌کننده مناسب‌ترین روش ساختمان‌سازی است. بااین‌وجود، می‌توان مخلوط‌های خاکی را جهت متناسب کردن آن با شرایط خاص تغییر داد [35]. "اقتصادی‌ترین و ساده‌ترین روش برای کنترل ترک‌ها و کاهش انقباض ناشی از رس، اضافه کردن ماسه یا کاه خشک به گل برای کنترل میکروترک‌ها است [xxi]" [36]. لذا برای دستیابی به فرمولاسیون جدیدی برای اختلاط مطلوب خاک، بنای ادامه کار بر این مبنا بوده که نمودار به محدوده هارمونی نزدیک شود. در این راستا، اصلاح منحنی دانه‌بندی براساس نمودار هارمونی و افزودن نوعی ترکیب ماسه مدنظر قرار گرفت و اختلاطی تحت عنوان "ماسه اصلاح‌شده" تهیه شد. با توجه به این‌که دانه‌بندی خاک‌ها بسیار شبیه هم بوده و اختلاف فاحشی بین خاک‌ها به لحاظ دانه‌بندی وجود ندارد، موقعیت قرارگیری منحنی دانه‌بندی تمامی خاک‌ها نسبت به محدوده هاشور زده در نمودار هارمونی (محدوده دانه‌بندی مطلوب خاک) مدنظر قرار داده شد و برای ورود یا نزدیک شدن منحنی دانه‌بندی به محدوده هارمونی، درصدی ماسه به ازای هر الک تعیین و به خاک‌ها افزوده شد. با توجه به مباحث انجام‌شده، نحوه اضافه کردن ماسه به ازای هر الک به شرح جدول شماره ۴ می‌باشد.

جدول۴ : نحوه تهیه ماسه اصلاح‌شده، مأخذ: پژوهشگران

شماره الک	درصد دانه مانده روی الک	شرح علت
$3/4$	٪۰	به علت عدم قرارگیری دانه‌های باقی‌مانده بر روی این الک در محدوده هارمونی، درصد در نظر گرفته معادل ۰ می‌باشد. قابل‌ذکر است با توجه به فاصله زیاد الک‌های $3/8$ تا الک شماره ۴ (عدم وجود الک‌های فی‌مابین در آزمایشگاه) دانه‌های بزرگ‌تر از الک $3/8$ جداسازی شدند.
$3/8$		
۴	٪۳	با توجه به زیادشدن تدریجی فاصله منحنی دانه‌بندی خاک‌ها از محدوده هارمونی بین الک‌های ۴ تا ۱۴۰، درصد دانه افزوده‌شده برای تهیه ماسه اصلاح‌شده نیز سیر صعودی داشته تا منحنی دانه‌بندی به محدوده هارمونی نزدیک‌تر شود. ذکر این نکته ضروری است که ورود منحنی دانه‌بندی خاک‌ها به محدوده هارمونی امکان‌پذیر نبوده زیرا با توجه به فاصله زیاد منحنی‌های دانه‌بندی از محدوده هارمونی، حجم دانه‌های افزوده‌شده به خاک بیشتر از حجم خود خاک بوده و لذا نقش خاک بسیار کمرنگ خواهد شد.
۱۰	٪۶	
۱۸	٪۸	
۴۰	٪۹	
۷۰	٪۱۰	
۱۴۰	٪۱۱	

سپس با توجه به افزودن ماسه اصلاح‌شده، برای تمامی خاک‌ها نموداری تحت عنوان "نمودار با افزودن ماسه اصلاح‌شده" ترسیم شد. به‌عنوان نمونه، چند مورد از خاک‌ها در حالت معمولی و با اضافه شدن ماسه اصلاح‌شده در شکل ۲ ارائه شده است. گفتنی است خط ممتد نمایانگر منحنی خاک معمولی و نقطه‌چین نمایانگر منحنی خاک اصلاح‌شده می‌باشد؛ همان‌طور که قابل‌مشاهده است با اصلاح خاک‌ها سعی شده منحنی دانه‌بندی خاک‌ها به محدوده هارمونی نزدیک شوند.



شکل۲ : نمودار دانه‌بندی دو نمونه از خاک‌ها پس از اصلاح دانه‌بندی، مأخذ: پژوهشگران

به‌منظور اصلاح دانه‌بندی، ابتدا تصمیم گرفته شد که نمودار دانه‌بندی مربوط به هر خاکی جداگانه اصلاح شود بدین‌صورت که تلاش شود نمودار کاملاً وارد محدوده هارمونی شود لذا به ازای هر الک باید حدود ۳۰٪ دانه اضافه می‌شد که درنتیجه میزان ماسه اصلاح‌شده بر خاک اصلی غالب شده و عملاً ویژگی‌های خاک اولیه بسیار کمرنگ می‌شد و نتایج سنجش آزمون فشاری قابل اتکا نبود. نتیجتاً تلاش نگارندگان بر این بوده است تا بیش از ۳۰ درصد از حجم خاک به ماسه اصلاح‌شده اختصاص داده نشود تا خاک اصلی بخش عمده ترکیب را تشکیل داده و غالب باشد؛ اگرچه در عمل درصد ترکیبات در برخی موارد کمی از این ۳۰ درصد فراتر رفته است. با این توضیحات، امکان اینکه با اضافه کردن ماسه اصلاح‌شده نمودار دانه‌بندی کاملاً مطابق با محدوده مشخص‌شده باشد میسر نخواهد شد و تلاش در جهت نزدیک شدن نمودار به محدوده مشخص‌شده صورت پذیرفته است.

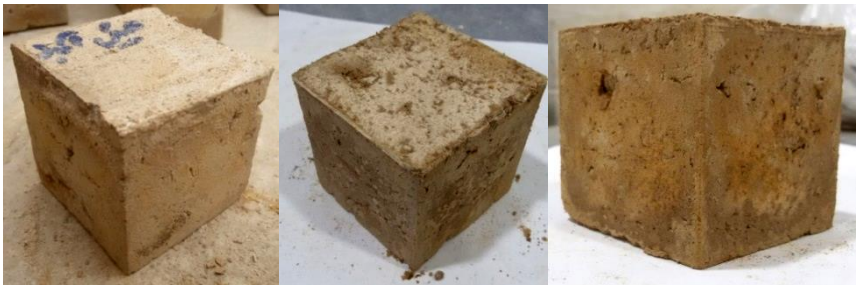
۵-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها برای مقاومت فشاری

پس از اصلاح دانه‌بندی خاک‌ها، به ازای هر معدن خاک، نمونه‌های خشت فشاری به ابعاد ۵*۵*۵ برای ۱ گروه شاهد و ۴ گروه آزمایشی ساخته شد. برای گروه شاهد، از روش ساخت سنتی استفاده‌شده بدین‌صورت که بعد از آبخوره کردن خاک با افزودن آب به میزان ۲۸ درصد، به مدت ۵ دقیقه به خاک زمان داده تا خیسانده شود، سپس اختلاط به مدت تقریبی ۱۵ دقیقه با دست ورز داده شد. ترکیب برای مدت ۲۴ ساعت داخل پلاستیک دربسته نگهداری شد تا عمل‌آوری صورت گیرد. پیش از قالب‌گیری، قالب‌ها را با آب خیسانده و گل با قوای دست داخل قالب جایگیری شد تا نسبت به پر شدن گوشه‌ها اطمینان حاصل شود. نهایتاً روی قالب با دست و اندکی آب صاف شد. این روش ساخت در خشت‌زنی سنتی به خشت آبمال معروف است.

برای ساخت نمونه‌ها در ۴ گروه آزمایشی از تثبیت مکانیکی و فیزیکی بهره گرفته شده و براساس ترکیبی از روش ساخت بلوک-های خاک فشرده، روش ساخت خشت در مطالعات انجام‌گرفته در سطح جهانی و روش سنتی ساخت خشت در ایران [xxiii] است. علت به‌کارگیری این روش ساخت ترکیبی، نتایج مطلوب ناشی از تثبیت مکانیکی در بلوک خاک فشرده و دیوار خاک کوبیده بوده است زیرا باعث ایجاد مقاومت مکانیکی مطلوب با نیروی فشاری دینامیک، ایجاد سازه همگن‌تر و نهایتاً پایداری بیشتر می‌شود [۲۱ و ۳۷].

لذا برای ساخت نمونه‌های خشتی تثبیت‌شده، ابتدا خاک (یا ترکیب خاک و ماسه اصلاح‌شده که به‌صورت خشک با هم مخلوط شده) را داخل سینی لبه‌دار پخش کرده، آب را با درصد مشخصی به‌صورت آبخوره داخل سینی ریخته و پس از گذشت کمتر از ۵ دقیقه (به دلیل امکان تبخیر آب و تغییر میزان آب مصرفی) عمل اختلاط صورت گرفت و کاملاً با دست ورز داده شد تا هیچ خاک خشکی باقی نماند. میزان آبی که به هر اختلاطی اضافه شد برحسب مقدار رس و حالت اشباع با سطح خشک مصالح تعیین شده و با توجه به میزان افزودن ماسه اصلاح‌شده، بین ۱۵٪ الی ۲۳٪ وزنی مجموع وزن خاک و مواد افزودنی متغیر بوده است؛ بدین‌صورت که نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معمولی به دلیل چسبندگی بالا نیاز به آب بیشتری در مقایسه با نمونه‌های ساخته‌شده با ۳۰٪ ماسه اصلاح‌شده داشته است. ایـن مقدار پس از سعی و خطا انتخاب شده است. سپس بنا به شیوه ساخت سنتی خشت، گل به مدت ۲۴ ساعت داخل پلاستیک دربسته [xxiii] نگهداری شده تا عمل‌آوری انجام شود. پس از گذشت یک روز، به علت کوتاهی مدت زمان عمل‌آوری [xxiv] و به‌منظور اطمینان از ترکیب کامل مخلوط، گل را ۲ بار داخل همزن ریخته تا به مدت یک دقیقه مخلوط شود.

درباره شیوه ساخت نمونه‌ها با تکیه بر پژوهشی که مرتبط با مقاوم‌سازی خشت انجام شده [18]، ترکیب را در سه لایه یکسان داخل قالب موردنظر ریخته و به‌منظور خروج هوای محبوس در گل، هر لایه با ابزاری با سطح مقطع مسطح، با ۲۵ ضربه کوبیده و فشرده و متراکم گردید[xxv]. نمونه‌ها به ۲۴ ساعت زمان نیاز داشتند تا پس از خودگیری اولیه، امکان جدا کردن نمونه‌ها از قالب وجود داشته باشد. همان‌طور که مینکه [21] اشاره می‌کند درصورتی‌که خاک حاوی مقدار زیادی رس باشد، قالب‌ها نباید با شدت از دیوار کنده شوند بلکه باید به موازات سطح دیوار بلغزند تا از خراب شدن سطح دیوار ناشی از چسبیدن ذرات رس به دیوار اجتناب شود؛ لذا با توجه به چسبندگی زیاد خاک معادن مربوطه، باز کردن قالب‌ها با احتیاط لازم و به شیوه مذکور صورت گرفت. همچنین یکی از اهداف مهم در تولید خشت این است که مواد به‌صورت یک توده‌ی همگن و فشرده و بدون ترک‌های داخلی خشک شود [۳۷]، ازاین‌رو به خشت‌ها (نمونه‌های ساخته‌شده) زمان داده شد تا به‌صورت طبیعی در هوای آزاد خشک شوند.



شکل۳ تا ۵ : نمونه‌هایی از نمونه‌های فشاری، مأخذ: پژوهشگران

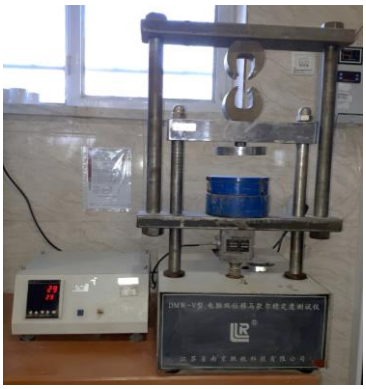
با توجه به انجام پژوهش در فصل پاییز، نمونه‌ها در محیط آزمایشگاهی با میانگین دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۰٪ نگهداری شده و یک ماه، میانگین زمانی است که برای خشک شدن تمام نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. پس از یک ماه، برای اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها، آن‌ها را در آون با دمای ۶۰ درجه قرار داده و هر ۲۴ ساعت وزن شدند تا زمانی که به وزن ثابت (کاملاً خشک) رسیدند. گفتنی است یکی از مواردی که در ساخت خشت‌های آزمایشگاهی (در پژوهش حاضر) موردتوجه بوده، به‌کارگیری تراکم و کوبش گل در سه لایه است. این روش آماده‌سازی به‌منظور افزایش مقاومت خشت به روش تثبیت مکانیکی، دانه‌های خاک را متراکم می‌کند تا میزان تخلخل و منافذ آن کاهش یافته، جرم حجمی آن افزایش پیدا کرده و آب کمتری بتواند به داخل آن نفوذ کند و درنتیجه بلوکی با تراکم و مویینگی مناسب به وجود آید.

۵-۴- آزمون مقاومت فشاری

به‌منظور آزمون مقاومت فشاری، پیش از شکست نمونه‌ها اطمینان حاصل شد که خشت‌ها کاملاً خشک شده و دارای جرم ثابتی باشند، دارای ساختاری یکنواخت بوده و فاقد هرگونه ترک مرئی به چشم غیرمسلح باشند. سطح مقطع نمونه‌ها اندازه‌گیری شده، همچنین نمونه‌ها وزن حجمی مشابهی داشته و حداکثر اختلاف وزن حجمی قابل‌اغماض در خشت‌های تولیدی در یک مرحله کاری از ۱ درصد تجاوز نکرد [27]. سپس هریک از نمونه‌ها را به‌صورت جداگانه داخل دستگاه کالبیره‌شده قرار داده تا نیروی فشاری توسط جک مکانیکی (با ظرفیت ۵ تن و دقت یک کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) بر نمونه‌های خشتی اعمال شود. حداکثر سرعت بارگذاری دستگاه (۱۲۰ کیلوگرم بر ثانیه) به‌گونه‌ای تنظیم شد که فشار به‌صورت یکنواخت بر روی نمونه اعمال شود و اعمال بار تا شکستن نمونه‌ها ادامه یابد. حداکثر نیروی قرائت‌شده از شکست هر نمونه را یادداشت کرده و مقاومت فشاری براساس فرمول زیر اندازه‌گیری شد که نهایتاً میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه گزارش شده است.

$$\text{مقاومت فشاری } (\text{kg/cm}^2) = \frac{\text{حداکثر نیروی وارده } (kgf)}{\text{سطحی که نیرو بر آن اعمال می‌شود } (Cm^2)}$$

شکل۶ و ۷: نحوه شکست نمونه‌های فشاری



شکل ۸ : تصویر جک مکانیکی ملات شکن

قابل‌ذکر است که کلیه مراحل انجام آزمایش‌ها نیز توسط نگارندگان و در آزمایشگاه میراث فرهنگی اردکان و همچنین آزمایشگاه مکانیک خاک آزماپویان واقع در شهرستان اردکان انجام شده است.

۶- نتایج

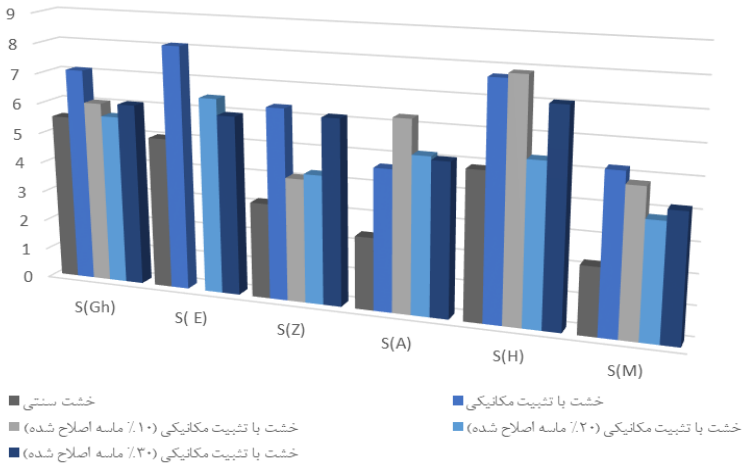
مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده، بخش اصلی این مقاله را شکل می‌دهد و ازاین‌رو پرداختن به تحلیل اولیه نتایج حاصل، آشنایی بهتری را با نمونه‌های مطالعاتی فراهم خواهد آورد. لذا یافته‌ها در قالب دو بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ در بخش اول، نتایج آزمون مقاومت فشاری ارائه می‌شود و با ارائه جداول و نمودار، تحلیل و ارزیابی می‌گردند. در بخش دوم نیز با توجه به تمرکز پژوهش حاضر بر بررسی تأثیر اصلاح دانه‌بندی بر مقاومت فشاری، سعی شده با توجه به دانه‌بندی هریک از خاک‌ها، رابطه نتایج مقاومت فشاری و دانه‌بندی مورد بررسی قرار گیرد.

۶-۱- سنجش مقاومت فشاری

سنجش مقاومت فشاری و بررسی نتایج حاصل از آن جهت مقایسه بین گروه شاهد و نمونه‌های ساخته‌شده با درصدهای مختلفی از ماسه اصلاح‌شده، بخش دیگری از نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی است. نتایج اولیه حاصل از مقاومت فشاری نمونه‌ها در قالب جدول ۵ و شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به تعداد زیاد نمونه‌ها (۹۰ نمونه)، در این جدول فقط میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه به ازای هر معدن خاک و هر گروه آزمایشی ارائه شده است. همچنین بیشترین مقاومت فشاری در هر گروه آزمایشی با رنگ متفاوت مشخص شده است.

جدول ۵: نتایج مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های فشاری، مأخذ: پژوهشگران

کد نمونه	اسم نمونه	اعمال تثبیت مکانیکی	درصد ماسه اصلاح شده	میانگین مقاومت فشاری (S_E)	میانگین مقاومت فشاری(S_M)	میانگین مقاومت فشاری (S_H)	میانگین مقاومت فشاری(S_{GH})	میانگین مقاومت فشاری (S_A)	میانگین مقاومت فشاری (S_Z)
A_{T1}-A_{T18}	خشت سنتی	-	۰	5/04	2/23	4/9	5/51	2/41	3/18
A_{ST1}-A_{ST18}	خشت تثبیت شده مکانیکی	√	۰	8/11	5/23	7/74	7/11	4/68	6/34
A_{ST19}-A_{ST36}	خشت تثبیت شده مکانیکی (۱۰٪ ماسه اصلاح شده)	√	۱۰	-	4/83	7/89	6/05	6/31	4/1
A_{ST37}-A_{ST54}	خشت تثبیت شده مکانیکی (۲۰٪ ماسه اصلاح شده)	√	۲۰	6/49	3/84	5/347	5/64	5/19	4/28
A_{ST55}-A_{ST72}	خشت تثبیت شده مکانیکی (۳۰٪ ماسه اصلاح شده)	√	۳۰	5/96	4/18	7/07	6/07	5/07	6/15



شکل ۹ : مقایسه مقاومت فشاری خشت معمولی و خشت اصلاح‌شده، مأخذ: پژوهشگران

با توجه به نتایجی که در قالب شکل ۹ ارائه شده است میزان تأثیر اصلاح دانه‌بندی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها متفاوت بوده و حتی در نگاه اول شاید نتوان هیچ ساختار منظمی برای آن‌ها در نظر گرفت. از طرفی، مشاهده می‌گردد که نتایج آزمون مقاومت فشاری در نمونه‌های ساخته‌شده به روش سنتی که دارای مقاومتی بین ۲ تا ۵ مگاپاسکال می‌باشند و همچنین نمونه‌های ساخته‌شده به روش‌های تثبیت فیزیکی و مکانیکی، در مقایسه با ارقام متفاوتی که در مورد میزان مقاومت فشاری خشت در منابع مختلف بیان‌شده قابل‌تأمل است. منابع و پژوهشگران مختلف دراین‌باره مفصلاً بحث کرده و اعداد متفاوتی برای این مقاومت مورد اشاره قرار گرفته است: بین ۱ مگاپاسکال تا ۲/۵ مگاپاسکال [۶]؛ میانگین ۲/۳۳ مگاپاسکال [۲۰]؛ حداقل ۲ مگاپاسکال [۲۴]؛ ۰/۷ مگاپاسکال [۳۰]؛ حداقل ۱/۲ مگاپاسکال [۳۸]؛ ۲ مگاپاسکال [۳۹]؛ میانگین ۳/۳ مگاپاسکال [۴۰]؛ حداقل ۱ مگاپاسکال [۴۱]؛ حداقل ۱/۸ مگاپاسکال [۴۲]. نتایج آزمون مقاومت فشاری در پژوهش حاضر بیانگر تغییر میزان مقاومت فشاری بین ۳/۸۴ مگاپاسکال تا ۸/۱۱ مگاپاسکال می‌باشد که از میانگین مقاومت فشاری خشت که مرور شد، بالاتر بوده و مطلوب می‌باشد.

با توجه به جدول ۵، از بین ۶ معدن خاک، نمونه‌های تثبیت‌شده مکانیکی و بدون افزودنی که با خاک ۴ معدن (عیش‌آباد، محمدآباد، قطب‌آباد و زردگ) ساخته شده‌اند، بیشترین مقاومت را در بین نمونه‌های سنتی و اصلاح‌شده دارند. در مورد ۲ معدن خاک دیگر، مقاومت فشاری خشت تثبیت‌شده مکانیکی با ۱۰ ٪ ماسه اصلاح‌شده و ساخته شده با خاک معدن حسین‌آباد بسیار نزدیک به مقاومت فشاری نمونه تثبیت‌شده مکانیکی است اما مقاومت فشاری خشت تثبیت‌شده مکانیکی (۱۰ ٪ ماسه اصلاح‌شده) با خاک علی‌آباد به میزان قابل‌توجهی بیشتر از نمونه تثبیت‌شده مکانیکی است که بایستی مورد بررسی شیمیایی نیز قرار بگیرد. به طور کلی، نمونه‌های تثبیت‌شده مکانیکی بدون افزودنی یا با کمترین میزان افزودنی (۱۰ ٪)، دارای بیشترین مقاومت بوده‌اند و در اکثر نمونه‌ها، اضافه شدن ماسه اصلاح‌شده موجب کاهش مقاومت نمونه‌های خشت شده و به جای تأثیر مثبت، تأثیر منفی داشته است. در جدول ۶، درصد تغییر مقاومت فشاری در نمونه‌های تثبیت‌شده مکانیکی برای معادن خاک (به جز معدن خاک علی‌آباد) نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۶: مقایسه درصد تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده مکانیکی نسبت به سایر نمونه‌ها، مأخذ: پژوهشگران

نام معدن خاک	مقاومت فشاری نمونه تثبیت‌شده مکانیکی	درصد تغییر به نمونه سنتی	درصد تغییر به نمونه اصلاح‌شده (۱۰٪)	درصد تغییر به نمونه اصلاح‌شده (۲۰٪)	درصد تغییر به نمونه اصلاح‌شده (۳۰٪)
S_E	۸.۱۱۱	+ ٪60.93	-	+ ٪24.96	+ ٪36.07
S_M	۵.۲۳۷	+ ٪134.84	+ ٪8.28	+ ٪36.19	+ ٪25.11
S_H	۷.۷۴۴	+ ٪58.04	- ٪1.90	+ ٪44.94	+ ٪9.47
S_{GH}	۷.۱۱۳	+ ٪29.09	+ ٪17.52	+ ٪20.06	+ ٪17.13
S_Z	۶.۳۴۳	+ ٪99.46	+ ٪54.63	+ ٪48.13	+ ٪3.08

همان‌طور که مشاهده می‌گردد نمونه‌های تثبیت‌شده مکانیکی که با خاک ۵ معدن ساخته شده‌اند، نسبت به تمامی نمونه‌های سنتی و اصلاح‌شده دارای مقاومت بیشتری بوده‌اند. به منظور کشف علت عدم پیروی نمونه‌های ساخته شده با خاک معدن علی‌آباد از روند ایجادشده، بایستی خاک معدن مذکور مورد بررسی‌های شیمیایی قرار گیرد.

۲-۶- تأثیر دانه‌بندی بر مقاومت فشاری

منحنی حاصل از دانه‌بندی خاک‌ها (به روش الک مرطوب و هیدرومتری) که در شکل ۱ ارائه شد نشان می‌دهد که خاک‌ها تا چه میزان داخل یا خارج محدوده مشخص‌شده برای تولید خشت مناسب قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در نمودارها قابل‌مشاهده است منحنی دانه‌بندی تمامی خاک‌ها بسیار شبیه به هم بوده و دارای درصد ریزدانه بالایی می‌باشند. همچنین در تمامی خاک‌ها، شیب منحنی بین الک‌های 3/4 و ۱۰ (شاخصه شماره الک‌ها) به‌طور تقریبی ثابت یا افزایش بسیار کمی داشته است ولی بین محدوده الک‌های ۱۰ تا ۱۴۰، منحنی دارای شیب قابل‌توجهی بوده و به‌تدریج درصد ریزدانه‌ها افزایش می‌یابد. براساس تعاریف موجود و آنچه در بخش پیشینه پژوهش

نیز مرور شد، خاک‌های موردبررسی، از منظر دانه‌بندی با محدوده خاک مناسب تطابق ندارند و میزان رس موجود در خاک‌ها بیشتر از اعدادی است که در منابع مختلف برای درصد مطلوب رس بیان شده است.

از طرفی با توجه به مشخصات دانه‌بندی خاک‌های معادن که در جدول ۲ ارائه شده، پنج معدنی که بیشترین مقاومت فشاری را با روش ساخت تثبیت مکانیکی بروز داده‌اند –با در نظر گرفتن معدن حسین‌آباد- دارای میزان رس حدود ۳۰٪ و حتی بالاتر بوده‌اند؛ لذا با توجه به رابطه مستقیم درصد رس و پیوستگی ذرات خاک با قابلیت تراکم خاک، و همچنین تأثیرگذاری قابل‌توجه تراکم خاک بر مقاومت فشاری نمونه‌ها، می‌توان یکی از علل مقاومت بالا در نمونه‌های ساخته شده با خاک این معادن را درصد بالای رس دانست. مطالعات محققین مختلف در مورد تغییر آرایش ذرات خاکهای رسی در اثر تراکم نشان داده‌اند که با افزایش انرژی تراکم و نیز با افزایش رطوبت تراکم، ذرات نازک و پولک‌مانند رس به نحوی آرایش می‌یابند که سطح پهن ذرات به موازات یکدیگر قرار گیرد و آرایش غیرمنظم (فلوکوله) ذرات تدریجاً به آرایش موازی (پراکنده) تبدیل می‌گردد. این تغییر آرایش می‌تواند در خصوصیات مکانیکی خاک متراکم شده تاثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

۷- بحث

یکی از موضوعات قابل‌تأمل در این پژوهش، نوسانات مقاومت فشاری نمونه‌ها و عدم وجود روند واضح صعودی یا نزولی مقاومت در نمونه‌های تثبیت‌شده است، این روند در شکل ۹ قابل ملاحظه است؛ با تأمل به این مسئله می‌توان پی برد که علاوه بر دانه‌بندی و ساختار فیزیکی رس، ساختار شیمیایی رس نیز عاملی بسیار تأثیرگذار در مقاومت فشاری خشت است. همچنین می‌توان به این موضوع توجه داشت که خواص شیمیایی خاک، شکل کریستال‌های رسی، درصد سطح برخورد ذرات رس با آب و لای نیز نقش بسیار مهمی در رفتار خشت دارند و تنها با اصلاح دانه‌بندی یک خاک و رفتار فیزیکی نمی‌توان به جواب‌های کاملی در تثبیت خاک (علی‌الخصوص در دو موضوع اصلاح دانه‌بندی و تثبیت مکانیکی) دست یافت. درنهایت با توجه به بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده برای خاک‌های هرکدام از معادن در اردکان می‌توان تحلیل‌های ذیل را ارائه نمود:

- **معدن خاک قطب‌آباد:** ۱۵ نمونه ساخته‌شده با این خاک در مقاومت فشاری دارای میانگینی معادل ۶/۰۵ مگاپاسکال بوده است، به‌گونه‌ای که نمونه تثبیت‌شده مکانیکی و بدون افزودنی دارای بیشترین مقاومت بوده و با افزایش ماسه اصلاح‌شده، سیر نزولی پیدا کرده و مجدداً افزایش یافته است. این خاک از نظر دانه‌بندی بین شش نمونه معدن خاک حاوی دانه‌های درشت‌تری بوده و با افزودن ماسه اصلاح‌شده به خاک، مقاومت فشاری از یک تابع سینوسی تبعیت کرده و ساختار منظمی در آن دیده نمی‌شود.

شکل۱۰ : نمونه ساخته‌شده با خاک معمولی قطب‌آباد

شکل۱۱ : نمونه خشت تثبیت‌شده قطب‌آباد

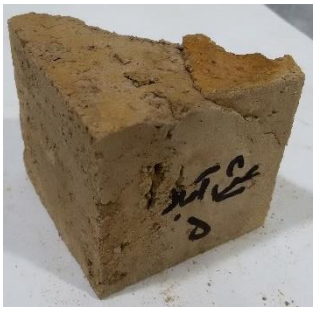
- **معدن خاک عیش‌آباد:** نمونه‌های ساخته شده با خاک این معدن نیز بیشترین مقاومت را در حالت تثبیت‌شده مکانیکی بروز داده‌اند. همچنین علی‌رغم مقاومت بالای نمونه خشت سنتی این خاک و همچنین مقاومت نسبتاً بالا در دو نمونه ۲۰٪ و ۳۰٪، روندی کاهشی در مقاومت فشاری وجود داشته لذا می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ماسه اصلاح‌شده به این خاک، منجر به مقاومت کمتری در خشت شده و باعث شده همگونی خاک به هم ریخته و اختلاط خاک را ناهمگون نماید. از طرفی، خاک این معدن دارای مقدار قابل‌توجهی سدیم یا ترکیبات نمکی بوده لذا باعث شوره زدن بر روی نمونه‌های خشتی شد. "یکی از پارامترهای مهمی که می‌تواند نقش مهمی در

مقاومت و استحکام خشت داشته باشد وضعیت سدیم در خاک مورداستفاده است. درصورتی‌که سدیم خاک نسبت به کاتیون‌هایی نظیر کلسیم و منیزیم بالا باشد می‌تواند منجر به پراکندگی ذرات خاک شود و چنانچه این نسبت در خاک مورداستفاده جهت تهیه خشت بالا باشد می‌تواند باعث کاهش مقاومت خشت شود. پس علاوه بر شاخص شوری باید به وضعیت کاتیون سدیم در خاک نیز توجه ویژه داشت به این دلیل که ممکن است خاک شور مقاومت و استحکام خشت را کاهش ندهد ولی یک خاک سدیمی عامل مهمی در این کاهش باشد. لازم به ذکر است که وجود ترکیباتی نظیر گچ و آهک نیز می‌تواند باعث ظاهر شدن ترکیبات سفیدرنگ بر روی خشت شود. " [xxvi].

شکل۱۲ : نمونه ساخته‌شده با خاک معمولی عیش‌آباد

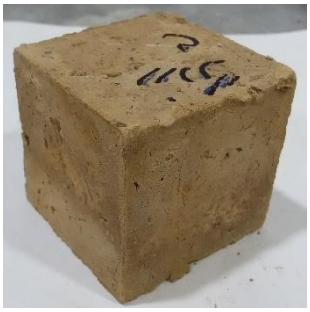
شکل۱۳ : نمونه خشت تثبیت‌شده عیش‌آباد

همان‌طور که در تصاویر زیر دیده می‌شود، بعضی از نمونه‌ها در هنگام باز کردن قالب به علت چسبندگی زیاد خاک، به قالب چسبیده و گاهاً نمونه شکسته شده و مجدداً ساخته شد. علت چسبندگی زیاد، درصد بالای رس بوده که در آزمون هیدرومتری نیز خاک معدن عیش‌آباد دارای بالاترین میزان رس بوده است.

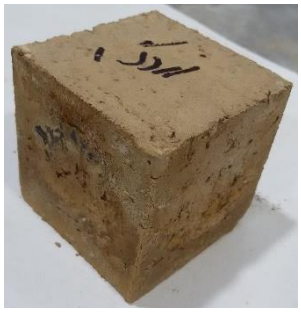


شکل۱۴ : نمونه خشت تثبیت‌شده عیش‌آباد

– **معدن خاک زردگ:** اگرچه قدمت منطقه زردگ به دوره ایلخانی برمی‌گردد اما نکته مهم در مورد این منطقه، تغییر کاربری بخش زیادی از منطقه به باغات پسته و فعالیت کشاورزی می‌باشد لذا خاک دستخوش تغییرات بسیاری شده و مملو از مواد آلی می باشد. این مسئله، کلسیم و فسفات خاک را افزایش داده و در اصطلاح عموم، خاک را چرب کرده است. خاک منطقه زردگ دارای همگونی نسبی در دانه‌بندی بوده و اعمال تثبیت مکانیکی باعث شده بیشترین مقاومت فشاری در این حالت ایجاد شود ولی افزودن ماسه اصلاح‌شده موجب شده دانه‌بندی خاک از همگونی خارج شود و مقاومت نمونه‌ها کاهش یابد. از طرفی، با افزایش میزان ماسه اصلاح‌شده، مقاومت فشاری در یک روند صعودی افزایش یافته است.



شکل۱۵ : نمونه خشت خاک معمولی زردگ



شکل۱۶ : نمونه خشت تثبیت‌شده زردگ

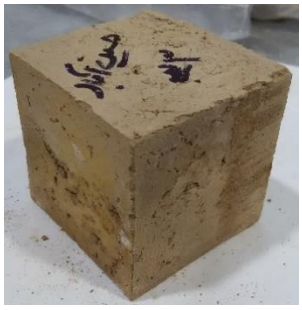
– **معدن خاک علی‌آباد:** خاک این معدن از نظر ساختار ماسه‌ای مشابه خاک معدن زردگ می‌باشد ولی نکته‌ای که می‌تواند افزایش مقاومت در حالت تثبیت‌شده مکانیکی و تثبیت فیزیکی با میزان ۱۰ ٪ ماسه اصلاح‌شده را توجیه نماید سطح جاذب مولکولی و ساختار کانی‌های خاک علی‌آباد می‌باشد که بایستی موردمطالعه دقیق‌تر قرار گیرد. هنوز هم خاک این معدن، به‌عنوان بهترین خاک جهت ساخت خشت در شهرستان اردکان شناخته می‌شود.

شکل۱۷ : خشت معمولی علی‌آباد

شکل۱۸ : خشت تثبیت‌شده علی‌آباد

شکل۱۹ : شکست نمونه خشت تثبیت‌شده علی‌آباد

– **معدن خاک حسین‌آباد:** خاک معدن حسین‌آباد فاقد دانه‌های باقی‌مانده بر روی الک‌های $^{3}/_{4}$ ، $^{3}/_{8}$ و ۴ بوده و نزدیک به ۹۰٪ از وزن خاک به زیرالک ۱۴۰ اختصاص یافته و میزان ریزدانه این خاک بسیار بالاست. این مسئله موجب تأثیر قابل‌توجه تراکم و تثبیت مکانیکی بر افزایش مقاومت فشاری شده است و مقاومت نمونه‌ها در تمامی حالت‌های تثبیت‌شده به غیر از حالت ۲۰ ٪ افزودنی بسیار مطلوب است. جهت بررسی علت کاهش مقاومت در حالت افزودنی ۲۰ ٪ میتوان مجدداً این آزمایش تکرار و همچنین بررسی‌های شیمیایی نیز صورت گیرد. بدون درنظر گرفتن این مورد، مقاومت بالای خاک و حد جاذب مولکولی آب در این خاک باعث گردیده ماسه اصلاحی در ساختار آن تغییر بسزایی ایجاد نکند و مقاومت همچنان در یک سیر مشخص قرار گیرد.



شکل۲۰ : نمونه خشت تثبیت‌شده و شکسته شده حسین‌آباد

– **معدن خاک محمدآباد:** این خاک کمترین مقاومت را در مجموعه شش معدن دارا بوده و از نظر ساختار، روند مشابه نمونه‌های ساخته‌شده با خاک قطب‌آباد را داشته است. می‌توان افزایش میزان ماسه اصلاح‌شده را در کاهش مقاومت مؤثر دانست اما نمی‌توان گفت ادامه این روند، همچنان باعث کاهش مقاومت خواهد شد. از طرفی، وجود لایه‌های نمکی بر روی خشت‌های تمامی نمونه‌های این خاک مؤید وجود نمک در اختلاط بوده که با افزودن ماسه اصلاح‌شده همچنان قارچ‌های نمکی نمود داشته، باعث سستی لایه‌های رویین شده و باعث شده خشت مقاومت کمتری در برابر اعمال فشار از خود بروز دهد.

شکل۲۱ و ۲۲ : نمونه ساخته‌شده با خاک معمولی

شکل۲۳ : نمونه خشت تثبیت‌شده

۸- نتیجه‌گیری

بررسی و مطالعات آزمایشگاهی که در قالب این مقاله انجام پذیرفت تلاشی برای بهبود خواص خاک بوده است. موضوع معماری با خاک از یک طرف و اقدامات حفاظتی مرتبط با آثار تاریخی گلین از طرف دیگر، ضرورت بهبود خواص خاک را پررنگ‌تر کرده است. در این پژوهش، با توجه به نتایج دانه‌بندی خاک‌ها و درصد بالای رس موجود در خاک، مشاهده گردید که نمونه‌های خشتی که بدون هیچ‌گونه افزودنی و به روش سنتی ساخته شده بودند از مقاومت مطلوبی در حد رعایت استانداردهای داخلی و خارجی برخوردار بوده‌اند. لذا می‌توان این‌گونه استنتاج نمود که ضمن لزوم بررسی مشخصات شیمیایی خاک‌ها، رابطه معناداری میان درصد بالای رس موجود در خاک و مقاومت فشاری خشت وجود دارد.

از طرفی، با توجه به نتایج حاصل از سنجش مفاومت فشاری نمونه‌های خشتی، تأثیر تثبیت مکانیکی بر مقاومت فشاری خشت در مقایسه با اصلاح دانه‌بندی قابل‌توجه است؛ موضوعی که بسته به ویژگی‌های شیمیایی انواع خاک، نوسان‌هایی نیز داشته است. نمونه‌های تثبیت‌شده در دو گروه بدون ماسه اصلاح‌شده و دارای ماسه اصلاح‌شده ساخته شدند که هر دو گروه دارای تثبیت مکانیکی بودند. نتایج بیانگر بهبود مقاومت فشاری در خشت‌های ساخته شده از خاک ۴ معدن به روش تثبیت مکانیکی و بدون افزودنی در مقایسه با خشت‌های سنتی و خشت‌های اصلاح‌شده با ماسه است، این مسئله نمایانگر تأثیر مطلوب تراکم و فشردگی در بهبود خواص مکانیکی خشت می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده با خاک ۲ معدن دیگر نیز بیشترین مقاومت را در حالت تثبیت‌شده مکانیکی با میزان ۱۰ ٪ ماسه اصلاح‌شده یا به عبارتی کمترین میزان افزودنی داشته‌اند. هرچند لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌های تثبیت‌شده مکانیکی، چه با افزودن ماسه اصلاح‌شده و یا بدون آن، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های سنتی داشته‌اند؛ این مسئله به سبب اعمال تثبیت مکانیکی بر نمونه‌ها حاصل شده و با توجه به نوسان مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزودن ماسه اصلاح‌شده، تثبیت فیزیکی را نمی‌توان علت افزایش مقاومت تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های سنتی دانست. با توجه به اینکه دانه‌بندی خاک‌ها به‌طور تقریبی مشابه یکدیگر بوده، علت این نوسان را می‌توان وابسته به خصوصیات شیمیایی خاک‌ها دانست. گفتنی است در این پژوهش صرفاً عملکرد فیزیکی خاک‌ها مدنظر بوده است و موضوع رفتار شیمیایی در پژوهش‌های آینده موردتوجه محققین قرار خواهد گرفت.

به طور کلی می‌توان این‌گونه استدلال نمود که در نمونه خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش، تثبیت مکانیکی و اعمال تراکم به خاک تأثیر مطلوب‌تری نسبت به تثبیت فیزیکی و اصلاح دانه‌بندی خاک‌ها داشته است، چرا که در اغلب موارد، خاک مورد استفاده برای خشت دارای حجم قابل‌توجهی ریزدانه و به ویژه رس است که پیوستگی میان ذرات خاک را تضمین می‌کند اما در این بررسی، افزودن ماسه موجب کم شدن انسجام خشت و کاهش مقاومت فشاری آن شده است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش قطعاً بدون مساعدت آقای دکتر ماجدی، مدیرکل محترم اداره استاندارد یزد؛ آقای مهندس فتاحی، مدیریت محترم آزمایشگاه فنی‌ومکانیک خاک آزماپویان و کارکنان محترم به‌ویژه آقای مهندس حاجی‌اکبری و آقای مهندس هاشمی‌نسب و همچنین

حمایت بی‌شائبه و راهنمایی پایگاه پژوهشی میراث فرهنگی بافت تاریخی اردکان علی‌الخصوص آقای دکتر میرجانی امکان‌پذیر نبود و قدردان الطاف این بزرگواران هستیم.

مراجع

[1] Alva. balderrame. Alejandro, (2008), *Earthen architecture*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute. pp 3.
[2] Islami, Moein. (2009). A Survey of Recent Scientific Achievements in the Conservation and Restoration of Earth Materials, *Two Quarterly Journal of Restoration of Cultural Heritage*. Year 5, Number 3. pp 19. [In Persian]
[3] Lant, MJ (1983). Stabilized adobe for Building. Translated by Forouz Roshanb. Tehran: Publication of the Research Center for Building and Housing. [In Persian]
[4] Hami, Mehrdad. (2003). *Construction materials*. Tehran: Unversity of Tehran. pp 78,142. [In Persian]
[5] Warren, John 1999. *Conservation of Earth Structures.* Butterworth-Heinemann. pp 37,71.
[6] Majedi Ardakani, Mohammad Hussein. (2005). Common faults in adobe buildings and their restoration methods, *Proceedings of the Third and Fourth Conservation and Restoration of Architectural Historical, Cultural and Decorative Objects*. Tehran: Published by the Cultural Heritage Organization, Department of Museums. [In Persian]
[7] Bouhicha, M., Aouissi, F., Kenai, S. (۲۰۰۵). Performance of composite soil reinforced with barely straw. *Journal of Cement and Concrete Composites*. ۲۷(٥). pp. .٦۲۱-٦۱۷.
[8] Degirmenci, N. (2008). The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. *Journal of Construction and Building materials*. 22(6). pp. 1220-1224.
[9] Velde, Bruce, (2008), Formation of Earthen Materials. *Terra Literature Review, An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*, Edited by Erica Avrami, Hubert Guillaud, and Mary Hardy, The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
[10] Houben, H. & Guillaud, H, (1994), *Earth construction – A comprehensive guide*. Intermediate Technology publications, London. pp 110.
[11] Kouakou, C.H., Morel, J.C. (2009). Strengths and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*. 44(102). pp. 27-34.
[12] Rahimnia, Reza. And Heidari bani, Darush. (1390). The Effect of Soil Density (PI) on the Compression and Tensile Strength of Cement Stabilized adobe for Use in the Protection of adobe Structures. *Journal of Restoration of Historical-Cultural Contexts*. 2 (1). [In Persian]
[13] esmaily A, Ghalehnovi M. The in fluence of palm fibres and lime as natural stabilizer on the mechanical properties of adobe, (in environmental condition contain 35% of humidity). *JHRE*. 2012; 31 (138). pp 53-62.
[14] Vatani Oskouei A, Afzali M, Madadipour M, Bakhshi A. Reinforcement Approach in Experimental Investigations of Mud Brick Wall under Diagonal Tension. *JHRE*. 2016; 35 (154). pp 107-124
[15] Hejazi M, Hashemi M, Jamalinia E, Batavani M. Effect of Additives on Mechanical Strengths of Adobe Made From Soils of Isfahan. *JHRE*. 2015; 34 (151). pp 67-80. [In Persian]
[16] Khodabande, Nahid. And Majedi Ardakani, Mohammad Hosein. And Veiseh, Sohraab. (1999). *Building materials using soil, plaster, lime and their mixtures in six provinces of Iran*. Tehran: Building and Housing Research Center.
[17] .Zami, M. S. & Lee. A, (2010), Stabilized or Un-Stabilized Earth Construction for Contemporary Urban Housing? , *proceedings of the 5th International Conference on Responsive 'Green' Manufacturing*, Ningbo, China, 11-13th January,pp 2-5.
[18] Shariful Islam, Mohammad & Iwashita, (2006), Seismic Response of Fiber-Reinforced and Stabilized Adobe Structure, *Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium*, the Getty Conservation Institute, Los Angeles, pp 12.
[19] Dominguez, Thomas, (2011), *ABCs of Making Adobe Bricks*, Cooperative Extension Service, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences.
[20] Shakib, Hamzae. and Majedi Ardakani, Mohammad Hosein. (2016). *Principles of Reinforcement of Rural Buildings*, Center for Natural Resistance Studies in Iran, under print. pp 42. [In Persian]
[21] Minke, Gernot. (2006). *Building With Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Translation of Shahin Tolo Ashtiani. Tehran: Cultural heritage, handicrafts and tourism publications. pp 84,85,104.[In Persian]
[22] North, Graeme, (2008), Earth Building", part of "*Waitakere City Council's Sustainable Home Guidelines*". Auckland : Waitakere City Council.
[23] Reardon, Chris, (2013), *Your Home, Australia's Guide to Environmentally Sustainable Homes*. Canberra Commonwealth of Australia (Department of Industry). pp 152.

[24] Hasani FakhrAbadi, MohammadHosein. And Jafarian Divkalayi, Hamed. (2013). Investigation of Habitak Building System Based on Native Architecture. In: *National Conference on Materials, City, Architecture*. Tehran, University of Yazd. [In Persian]
[25] Tabatabaee Ardakani, Mahmoud. (2002*). Public Culture of Ardakan*, Karname Publication. [In Persian]
[26] Sepehri Ardakani, Ali. (1995). *History of Ardakan*. Ardakan: publication of Honain. [In Persian]
[27] Carazas W. & Dugelay S. & Douline A. & El Gharbi Z. & Joffroy T. & Moles O. & Moriset S. & Oliver M, (2000), *Compressed earth blocks, testing procedures*. CDE, ENTPE et CRATerre-EAG.
[28] Maïni, Satprem, (2005), *Eearthen architecture for sustainable habitat and compressed stabilised earth block technology*, Auroville Building Centre - INDIA.
[29] Hamidi. Amir. (2011*). Soil Mechanics Laboratory Report*. Faculty of Engineering, Tarbiat Moalem University of Tehran. pp 6. [In Persian]
[30] Ilberg, Antje. & Rollins, Chris, (2007), *Low cost house Construction Manual*, RISD Rwanda Initiative for Sustainable Development.
[31] Daot, P & Hays, A & Houben, H & Matuk, S & Vitoux, F. (1991). *Building with earth*. Published by The mud village society, New dehli, India. pp 171.
[32] Rigassi, Vincent & CRATerre-EAG. (1985). *Compressed earth blocks: Manual of production*, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH in coordination with BASIN. pp 28-29.
[33] Boubekeur, s (CDI) & Houben, H (CRATerre-EAG). (1998). *Compressed earth blocks, standards*, CDI & CRATerre-EAG Publication. pp 71.
[34] Houben, Hugo & Rigassi, Vincent & Garnier, Philippe. (1996). *Compressed earth blocks, production equipment*, CDI &CRATerre-EAG Publication.
[35] Vafameer, Mohsen. and Shahroudi, Abbas Ali. and Saberi, Mohammad Reza. (2006). New Approach to Soil Utilization Methods in Desert Architecture. *Regional Scientific Conference on Desert Architecture*. Islamic Azad University, Ardestan Branch. [In Persian]
[36] International Association for Earthquake Engineering (IAEE), *Earthen Buildings, Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction*, (1986), Secretary General: Hirokazu Iemura.
[37] Office for the Development and Promotion of National Building Regulations. (2008). *The National Building Regulations of Iran, Eighth, Design and Implementation of Building Materials*, Fourth Edition, Iran Development Publications. pp 53. [In Persian]
[38] Harper, Doug, (2011), *Alternative Methods of Stabilisation for Unfired Mud Bricks*, School of Civil Engineering & Geosciences, Newcastle University.
[39] Abu-Hammad, N.O, (2011), Architectural Mud Brick Prototypes As Efficient and Sustainable Shelters for the Low-Income Group in Jordan, *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 5, No. 1, 2011.
[40] Parhizkar, Tayebe. And Majedi Ardakani, MohammadHosein. (2002). *Problems of materials used in the construction of the Changorah earthquake area*. Tahran: Iran Building and Housing Research Center. [In Persian]
[41] Wolfskile, Laila. and Donplap, Wayne. and Kalawi, Bob. (1987). *Use of earth in house construction*. Translation by Hossein Tabesh. Academic Publishing Center. [In Persian]

[i] . UNESCO
[ii] . ICCROM
[iii] . ICOMOS
[iv] . CRATerre/Grenoble
[v] . Getty Conservation institute GCI
[vi] . Auroville
[vii] . AKDN
[viii] . Cal–Earth
[ix] . TERRAKorea
[x]. Pontifical Catholic University of Peru (PUCP)
[xi]. University of Kassel
[xii]. در این میان، مرکز تحقیقاتی CRATerre/Grenoble (بخش مطالعات خاک در گرونوبل فرانسه)، مجموعه‌ای غیردولتی و مروج معماری پایدار از طریق استفاده از مصالح بومی در سطح دنیا می‌باشد و با توجه به اینکه پژوهش حاضر پیرو فعالیت‌های این مرکز در شهرستان اردکان انجام شده، مروری بر فعالیت های این مؤسسه در استان یزد و شهرستان اردکان خالی از لطف نیست. این مؤسسه در نیمه سال ۱۳۸۸ در اردکان در طرح "احیای بافت تاریخی شهرستان اردکان با مشارکت کلیه ذی‌نفعان به ویژه ساکنان بافت" شروع به فعالیت کرد. یکی از اولین اقدامات این موسسه در اردکان، ایجاد آزمایشگاه خاک و خشت با همکاری اداره میراث فرهنگی شهرستان اردکان و راه اندازی میز لرزه بود. در این سال با مشارکت اداره میراث

فرهنگی و سازمان بهسازی و نوسازی شهرداری اردکان، مرمت خانه طبائی به عنوان یک نمونه از خانه‌های آسیب‌پذیر در بافت تاریخی اردکان به عهده نیروهای مرکز کراتر گذاشته شد. همچنین در سال ۱۳۸۹ اقدام به طراحی مجموعه بازارچه صنایع دستی اردکان با بکارگیری مصالح خشت و با توجه به اصول مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی کرد. در طی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲، مرکز کراتر چند پروژه طراحی و آموزش را در اردکان پایه گذاری کرد که از آن جمله می توان به طرح آسیب شناسی و مرمت خانه صغیره، طرح بازسازی معبر دروازه میرصالح، طرح آموزش به استادکاران بنا و کارگران جوان و بررسی خاک شناسی و مقاومتی معادن خاک اردکان اشاره کرد. این پژوهش نیز در ادامه فعالیت مرکز در حوزه خاک‌شناسی معادن خاک اردکان انجام گرفته است.

[xiii]. مصاحبه با پایگاه پژوهشی بافت تاریخی اردکان: میرجانی ارجنان،۱۳۹۶.

[xiv] . حسین کمالی، معمار سنتی، معمار پیشکسوت استان یزد و شهرستان اردکان؛ محمدعلی کریمی، معمار سنتی مشغول به کار در میراث فرهنگی اردکان.

[xv]. مصاحبه با مهندس فتوحی، کارشناس پایگاه پژوهشی بافت تاریخی اردکان.

[xvi]. ASTM

[xvii] . در دانه‌بندی به روش الک مرطوب، با شستن خاک و جدا کردن دانه‌ها از درشت‌ترین الک شروع کرده و به ترتیب ادامه داده تا به ریزترین الک برسیم. این روش به ما اطمینان می‌دهد که ذرات خیلی کوچک گردوغبار که به دانه‌های درشت‌تر چسبیده‌اند و ذرات رس و کلوخه‌های درشت خاک، شسته شده و از سوراخ مورد نظر عبور می‌کنند. سپس اوزان دانه‌های مانده روی الک‌ها یا دانه‌های رد شده از وزن کل نمونه محاسبه می‌شوند و درصدهای بدست آمده در محاسبات یا نمودارها استفاده خواهند شد.

[xviii] . Adobe

[xix] . Compressed Earth Block

[xx] . Rammed Earth

[xxi] . قابل‌ذکر است که علی‌رغم بیان این نکته که خاک‌رس بیش از اندازه موجب می‌شود انقباض افزایش یابد و ترک‌های داخلی استحکام بنا را کاهش می‌دهد، نمونه‌های ساخته‌شده با خاک خالص دارای ترک‌های قابل‌توجهی نبوده و مقاومت مطلوبی نیز حاصل شده است.

[xxii] . در شیوه سنتی برای ساخت خشت، پس از عمل‌آوری مطلوب، خاک را کپه کرده، در آن آب می‌ریختند و آبخوره می‌کردند، عمل آبخوره کردن به مدت ۲۴- ۴۸ ساعت ادامه پیدا کرده تا پس از گذشت زمان مشخص، آب جذب خاک شود. گل را ورز داده و به حال خود رها کرده تا به شکل خمیری تبدیل گردد، سپس خمیر حاصله در چند نوبت ورز داده و چندین بار برگردانده می‌شود تا به حالت یکدست و چسبنده تبدیل گردد و بعداً ترک نخورد. در گذشته عمل ورزدادن با کمک پا انجام می‌شده تا گل به‌صورت موئینه درآید. گل برای مدتی به نحوی نگهداری می‌شود که رطوبت آن در معرض تبخیر قرار نگیرد (امروزه با پلاستیک پوشانده می‌شود) و بهتر برسد. ساده‌ترین راه تشخیص رسیدن گل، نچسبیدن آن به دست است. آنگاه گل به‌دست‌آمده را در قالبی چوبی (قالب خشت‌مالی) ریخته و با فشار دست تا حد امکان متراکم کرده و سطح آن با دست هموار می‌شود. سپس قالب را جدا کرده و خشت را در برابر تابش آفتاب قرار داده تا بسته به میزان گرمی هوا بین یک هفته و بیشتر خشک شود، در صورت گرمای زیاد با پاشیدن خاک روی خشت‌ها از تبخیر زودهنگام و ترک جلوگیری می‌شود (مصاحبه با آقای مهندس فتوحی، کارشناس پایگاه پژوهشی بافت تاریخی اردکان و آقای محمدعلی کریمی، معمار سنتی مشغول به کار در میراث فرهنگی اردکان).

[xxiii] . گل به علت حجم کم آب مصرفی و امکان تبخیر آن، در پلاستیک دربسته نگهداری می‌شد.

[xxiv] . براساس پژوهشی که توسط باتر و همکاران وی در مقاله ای تحت عنوان تأثیر مدت زمان عمل آوری ملات سنتی کاهگل بر مقاومت فشاری و کششی آن، فصلنامه مسکن و محیط روستا (۱۳۹۶) انجام شده، مناسب ترین محدوده زمانی برای عمل آوری کاهگل ۲-۳ شبانه روز می‌باشد. با توجه به عدم وجود تحقیق مبنی بر عمل آوری خشت، به همین پژوهش استناد شده است.

[xxv] . در توجیه علت کوبش ۲۵ مرتبه‌ای قابل ذکر است که در دهه ۱۹۲۰، آزمونی استاندارد برای تعیین میزان تراکم یک توده خاک یا مصالح خاکی که تحت فشار دینامیک قرار می‌گیرد، توسعه یافت. این آزمون، Proctor نام دارد. در این آزمون، یک نیروی فشاری دینامیک با وزنی معادل ۲ پوند (0.907 کیلوگرم) از فاصله یک فوتی (0.30 متر) به تعداد ۲۵ مرتبه بر نمونه ای با ضخامت و قطر مشخص وارد می‌شود [۹]. در ساخت نمونه های این پژوهش نیز سعی شده فاصله، دفعات وارد شدن ضربه و فشار وارده در تمام نقاط، یکسان باشد و در کوبیدن گوشه‌ها نیز دقت لازم به عمل آید.

[xxvi] مصاحبه با آقای دکتر مصطفی شیرمردی. دکتری خاکشناسی، گرایش شیمی خاک؛ استادیار گروه علوم باغبانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه اردکان.