The Art of Green Management
eISSN:2980-9673
Homepage: https://agm.journal.art.ac.ir/

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Feasibility Assessment of Green Building Materials Based on Rammed Earth Technology in Building Construction

Sara Khadjavian [1] *

1. Master of Architecture and Energy, Department of Architectural Techniques & Project Management, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran. (https://orcid.org/0000-0002-1763-163X)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO

Received: 30/01/2026
Revised: 16/03/2026
Accepted: 18/03/2026
PP. 27-49

Keywords:
Green building material, Rammed Earth technology, Mechanical and thermal factors, Compressive strength, Thermal strength.

Use your device to scan and read the article online

ABSTRACT

Introduction:
Rammed Earth is both a construction technology and a building material characterized by very low embodied energy. This characteristic is primarily associated with the reduced energy consumption required for the production and transportation of the material. Specifically, the energy consumed during these stages accounts for approximately 29–40% of the total embodied energy of Rammed Earth materials. Furthermore, Rammed Earth houses demonstrate favorable thermal performance, as they can maintain comfortable indoor temperatures without requiring substantial energy consumption for heating and cooling .Regarding previous research conducted in Iran, reference can be made to the laboratory and field studies, as well as the implementation of educational workshops on earth architecture, carried out by the author in collaboration with the Research Institute of Vernacular Architecture at Yazd University. Subsequently, the laboratory process of manufacturing building materials using Rammed Earth technology and measuring their mechanical and thermal performance parameters was further investigated in a master's thesis entitled Investigation of the Thermal Comfort of Rammed Earth Housing in the Hot and Arid Climate of the Yazd Region.

The Purpose of the Research:
The primary objective of this research is to investigate the feasibility of applying Rammed Earth technology in the production of green building materials and to evaluate its potential contribution to sustainable construction practices. The study particularly focuses on the mechanical and thermal performance of Rammed Earth blocks, considering that these properties are among the most important factors determining their suitability for building applications. In addition, the research examines the practicality of the production process, the adaptability of the technology to different geographical and climatic conditions, and its potential environmental advantages compared with conventional construction materials.

Methodology:
The present study is applied research based on laboratory investigations. The experimental program involved the fabrication of eight Rammed Earth block specimens using soil samples collected from different locations in Yazd, Iran, including Akramabad, Maryamabad, Meybod, and Yazd University. Following the particle size distribution analysis of the collected soil samples, the soil obtained from Akramabad was identified as the most suitable material for manufacturing Rammed Earth blocks. Accordingly, the subsequent fabrication procedures and evaluation of the mechanical and thermal properties were conducted using soil from Akramabad. The experimental investigations focused primarily on determining the mechanical properties, particularly compressive strength, and the thermal properties, specifically the thermal conductivity of the building materials. Initially, a series of laboratory tests, including soil particle size distribution analysis, hydrometer tests, and soil compaction tests, were performed. The resulting data were collected, processed, and analyzed, and subsequently presented in the form of tables and graphical representations. Data collection was carried out manually, while data processing and analysis were performed using appropriate software. Subsequently, their compressive strength and the thermal resistance of the wall assembly incorporating the developed material were evaluated. To validate the collected data and assess the reliability of the findings, specialists with relevant expertise in each field, including

ARTICLE INFO	ABSTRACT

mechanical, structural, and thermal performance assessment, were consulted. Furthermore, the validity and consistency of the experimental results were examined through comparison with findings reported in previous studies.

Findings and Discussion:

The production process and experimental investigations of Rammed Earth materials indicate that the manufacturing of these materials requires fine-grained clay soil with an appropriate particle-size distribution, washed sand, and a small proportion of gravel. According to previous studies, the appropriate mix proportions for producing Rammed Earth blocks (CEBs) are approximately 10–30% gravel, 40–60% sand, 30–50% clay and silt, 3–5% cement, and 8–12% moisture content. In the specimens produced in the present study, the appropriate mix proportions for Rammed Earth blocks consisted of approximately 40% clay and silt, 40–50% sand, 3–5% cement, and approximately 8–10% water. The proportions of clay and sand may vary by up to 10%, depending on soil composition and climatic conditions. In most cases, a moisture content of up to 10% is sufficient, although it may occasionally increase to 12%, as higher moisture contents can adversely affect the compaction process. According to Section 8 of the Iranian National Building Regulations, the minimum and permissible compressive strength requirements for load-bearing walls are 2 and 3.5 MPa, respectively. However, the materials tested in the present study achieved compressive strengths of 3.72, 3.85, and 2.73 MPa. Thermal performance tests were conducted on the materials in accordance with relevant standards, and the results were validated against previous research findings. The measured thermal resistance of the 30-cm-thick compressed earth wall was 0.49 $m^2 \cdot K/W$. This result is consistent with previous studies, which have reported a thermal resistance of approximately 0.5 $m^2 \cdot K/W$ for a 30-cm-thick rammed earth wall. Since this thermal resistance does not satisfy the required thermal performance criteria, the incorporation of thermal insulation is necessary in accordance with Section 19 of the Iranian National Building Regulations. It is recommended that the insulation be installed within the central layer of the wall. Accordingly, a double-leaf wall configuration is proposed, consisting of a 20-cm-thick external layer and a 10-cm-thick internal layer, with a 10-cm-thick thermal insulation layer positioned between them. This solution increases the wall's thermal resistance from 0.49 to 2.31 $m^2 \cdot K/W$, considerably reduces heat transfer from the exterior to the interior of the building, and contributes to energy savings. It is advisable to construct the building plinth using stone or other moisture-resistant materials to prevent rising damp from penetrating the earth-based construction elements. It should also be noted that the traditional rammed earth boundary walls surrounding historic gardens represent a long-established method of soil compaction. These structures have withstood weathering and erosion for many years and have maintained their stability over time. Considering the aforementioned findings and the results of the experimental investigations, the feasibility of using compressed earth materials produced through Rammed Earth technology in building construction can be confirmed.

Conclusion:

The feasibility of employing green building materials produced using Rammed Earth technology can be established through the collective assessment of several parameters, including mechanical properties, thermal performance, fire resistance, and moisture resistance, followed by an overall evaluation of the findings. The assessment of mechanical parameters is conducted to determine the appropriate proportions of each constituent material in the mix design and to ensure that the required compressive strength of Rammed Earth blocks is achieved. Thermal performance measurements, on the other hand, aim to evaluate the potential for passively meeting part of a building's heating and cooling energy demands. Furthermore, fire resistance and moisture absorption tests are necessary to obtain the required technical and engineering data and to determine the suitability of Rammed Earth materials for specialized applications at full scale. Improving the thermal resistance of wall assemblies represents an important direction for future research on building materials manufactured using compressed earth technology. Furthermore, limitations in the availability of laboratory equipment and measurement instruments, together with restricted access to the required testing facilities, have made the research process more complex and time-consuming. These constraints have also discouraged broader participation in field-based and laboratory research, thereby limiting the opportunities for researchers to contribute to the development and advancement of technologies within the construction industry.

Funding: There is no funding support.

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Conflict of Interest: Author declared no conflict of interest.

AI Usage Declaration: Author declared that ChatGPT has been used in the English abstract section to ensure a more accurate and fluent translation.

Acknowledgments: I would like to express my sincere gratitude to Dr. Nariman Farahza, a faculty member of the Faculty of Architecture at Yazd University, for facilitating communication with the Materials Laboratory and providing access to its facilities. The author also wish to thank Dr. Hamid Rezaeian Yazdi for his valuable scientific advice and guidance regarding the measurement of the thermal conductivity coefficient of Rammed Earth materials in this study.

Highlight:

- The field research is based on the standards and regulations referenced in the text. The findings have been derived by drawing on previous research results and validated against them, thereby ensuring their reliability and verifiability.
- Rammed Earth is both a building material and a construction technology, with the potential to be developed into a green and resource-efficient building material.

This paper is an open access and licensed under the Creative Commons CC BY-NC 4.0 license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Khadjavian, S. (2026). Feasibility Assessment of Green Building Materials Based on Rammed Earth Technology in building construction. *The Art of Green Management*, 4(1), 27-49. **10.30480/agm.2026.6662.1096**

http://doi.org/10.30480/agm.2026.6662.1096

OPEN ACCESS

http://agm.journal.art.ac.ir/article_1581.html

*. Corresponding Author (Email: s.khadjavian@art.ac.ir)/ (Phone: +989197947329)

This article is taken from the master's thesis of the author with the title Investigation of thermal comfort in Rammed Earth houses of hot and dry climate in Yazd region has been defended at the Iran University of Art.

هنر مدیریت سبز
شاپا الکترونیکی: ۹۶۷۳-۲۹۸۰
شاپا چاپی: ۰۷۵۶-۲۷۱۷
مقاله علمی-پژوهشی

امکان سنجی بکارگیری مصالح ساختمانی سبز با فناوری خاک فشرده در صنعت ساختمان

سارا خواجویان [1]*
۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد معماری و انرژی، گروه فنون معماری و مدیریت پروژه، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران.
(https://orcid.org/0000-0002-1763-163X)

ناشر: دانشگاه هنر ایران

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷
صص. ۲۷-۴۹

واژگان کلیدی:
مصالح ساختمانی سبز، فناوری خاک فشرده، معماری پایدار، فاکتورهای مکانیکی، مقاومت حرارتی، بحران انرژی.

چکیده

مقدمه: ظرفیت حرارتی بالای خاک دلیلی بر استفاده از این مصالح در صنعت ساختمان است. خاک فشرده هم یک فناوری و هم یک مصالح ساختمانی با انرژی نهان بسیارکم است. به‌منظور امکان سنجی استفاده از مصالح خاک فشرده در صنعت ساختمان، تعیین فاکتورهای مکانیکی و حرارتی مصالح الزامی است. بنابراین، در این پژوهش قرار است ضمن استفاده از نتایج پژوهش‌های پیشین و فرآیند میدانی طی شده به فاکتورهای تعیین کننده ویژگی های مکانیکی و حرارتی پاسخ داده شود تا نتایج آن‌ها بررسی و امکان‌سنجی استفاده از مصالح ساختمانی سبز با فناوری خاک فشرده در صنعت ساختمان تبیین شود.

هدف پژوهش: با توجه به بحران انرژی موجود، هدف تحقیق استفاده از مصالح ساختمانی سبز و پاسخ به بخشی از نیاز صنعت ساختمان در حوزه‌ی معماری سبز و توسعه پایدار است.

روش‌شناسی: پژوهش حاضر از نوع کاربردی است و بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی شکل گرفته است. ابتدا فرآیند آزمایشگاهی ساخت مصالح انجام و تعدادی نمونه از بلوک خاک فشرده ساخته شده است. در ادامه فاکتورهای مکانیکی و حرارتی مصالح اندازه گیری شده و نتایج حاصل شده با نتایج مطالعات پیشین مقایسه و بدین‌ترتیب اعتبار سنجی نتایج حاصل شده است.

یافته‌ها و بحث: نسبت اختلاط مصالح در بلوک خاک فشرده برای خاک رس، ماسه، سیمان و آب به ترتیب برابر با ۴۰، ۴۵، ۵ و ۱۰ درصد است. حداقل مقاومت فشاری بلوک خاک فشرده ۲ مگاپاسکال است که در تست‌های انجام شده تصدیق شده است. مقاومت حرارتی جدار متشکل از مصالح خاک فشرده به ضخامت ۳۰ سانتی متر ۰,۴۹ متر مربع کلوین بر وات است که با استفاده از عایق حرارتی در لایه میانی دیوار طبق پیشنهاد مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، مقاومت آن به ۲,۳۱ مترمربع کلوین بر وات ارتقاء می‌یابد. یافته‌ها نشان می‌دهد تست‌های انجام شده بر روی مصالح در انطباق با استانداردها عمل می‌کنند و با نتایج پیشین اعتبارسنجی شده است. بنابراین، بکارگیری مصالح با استفاده از فناوری خاک فشرده در ساختمان قابل تصدیق است.

نتیجه‌گیری: امکان‌سنجی بکارگیری مصالح ساختمانی سبز با فناوری خاک فشرده، با سنجش جمعی از فاکتورهای مکانیکی، حرارتی، مقاومت در برابر حریق و رطوبت به همراه نتیجه گیری از این فرآیند حاصل می‌شود.

نکات برجسته:

- مبنای تحقیقات میدانی پژوهش، استانداردها و مقررات اشاره شده در متن است و نتایج حاصل شده با اتکا به نتایج پیشین و اعتبارسنجی با آن ها صورت گرفته و قابل تصدیق است .
- خاک فشرده هم یک مصالح ساختمانی و هم یک فناوری ساخت است که قابلیت ارتقا به مصالح ساختمانی سبز و مصالح کم مصرف را دارد.

ارجاع به این مقاله: خواجویان، سارا (۱۴۰۵). امکان سنجی بکارگیری مصالح ساختمانی سبز با فناوری خاک فشرده در صنعت ساختمان، *هنر مدیریت سبز*، ۴(۱)، ۴۹-۲۷. 10.30480/agm.2026.6662.1096

http://doi.org/ 10.30480/agm.2026.6662.1096

http://agm.journal.art.ac.ir/article_1581.html

OPEN ACCESS

این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز Creative Commons CC BY-NC 4.0 قابل استفاده است.
©2024, UST. All rights reserved.

*. نویسنده مسئول (رایانامه: s.khadjavian@art.ac.ir)/ (تلفن: ۰۹۸۹۱۹۷۹۴۷۳۲۹+)

۱- مقدمه

بحران انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی موجود سبب بازنگری در استفاده از نوع مصالح و سیستم‌های ساختمانی مورد استفاده می‌شود. همچنین؛ اتلاف حرارتی مصالح مرسوم مورد استفاده در ساختمان ها، میزان انرژی مورد نیاز برای سرمایش و گرمایش در ساختمان‌ها را افزایش داده، از طرفی عدد سرانه ساخت‌وساز نیز رشد قابل توجهی کرده و در مجموع میزان مصرف انرژی در ساختمان‌ها افزایش یافته است. بنابراین؛ جهت کاهش مصرف انرژی و آلودگی محیط زیست، استفاده از مصالح با حداکثر ظرفیت حرارتی ویژه توصیه می‌شود. خاک فشرده هم یک فناوری و هم یک مصالح ساخت با انرژی نهان بسیار کم است، این موضوع اشاره به کاهش انرژی مصرفی در بخش تولید و حمل‌ونقل دارد. بطوریکه میزان انرژی مصرفی در این بخش، ۲۹ تا ۴۰ درصد کل انرژی نهان این مصالح ساخت می باشد (Dong et al., 2014). علاوه بر این خانه های خاک فشرده از نظر حرارتی کارآمد هستند زیرا بدون نیاز به مصرف انرژی زیاد جهت سرمایش و گرمایش قادر به حفظ درجه حرارت مناسب در محیط داخل هستند (Dong et al.,2014). در رابطه با پیشینه تحقیق در داخل می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی و میدانی و برگزاری کارگاه‌های آموزشی، اجرایی معماری خاک توسط نگارنده در همکاری با پژوهشکده معماری بومی دانشگاه یزد اشاره کرد و در ادامه فرآیند آزمایشگاهی ساخت مصالح با فناوری خاک فشرده و اندازه گیری فاکتورهای حرارتی آن در پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان بررسی آسایش حرارتی مسکن خاک فشرده در اقلیم گرم و خشک منطقه یزد طی شده است (خواجویان، ۱۴۰۰، ۱۰۷). همچنین، شرکت فناور مهندسی پدیده نشان پایا انرژی که در محل مرکز رشد و کارآفرینی دانشگاه هنر ایران مستقر است، در حال انجام مطالعات بیشتر بر روی ارتقاء ویژگی‌های حرارتی مصالح با فناوری خاک فشرده است. دو نمونه از مسکن خاک فشرده در منطقه‌ی یزد با کاربری های خانه باغ در شهر یزد و سوئیت در شهرستان مهریز توسط آقای مهندس اصغری طراحی و اجرا شده است (اصغری، ۱۴۰۰). در خارج از ایران موسسه کراتر در فرانسه[۱]بر روی مصالح از جنس کار م‌کند و علاوه بر انجام پژوهش‌های میدانی، کارگاه‌های عملیاتی نیز در این حوزه برگزار می‌کند. نمونه‌های اجرا شده‌ی ساختمان‌های از جنس خاک فشرده به وفور در کشورهای اروپایی، آمریکای جنوبی و استرالیا قابل مشاهده است. اجرای ساختمان‌های با تکنیک ابرخشت همان تکنیک خاک فشرده است که همچنین؛ در ایران و خارج از ایران نمونه‌های اجرا شده دارد.

در ادامه به معرفی نتایج مطالعات انجام شده در خصوص ساختمان‌های خاک فشرده در ایران و خارج از ایران پرداخته می‌شود. در پژوهشی با عنوان نفوذ رطوبت در خاک فشرده: جذب پذیری موئینه، پذیرندگی سطح و سرعت جریان ورودی به سطح، نفوذ رطوبت در ساختمان خاک فشرده بررسی شده و نتیجه نشان می‌دهد که جهت کاهش جذب رطوبت موئینگی خاک فشرده باید نسبت اختلاط مواد را در هنگام ساخت ملات کنترل کرد. افزودن ۶ درصد حجمی سیمان در دستور اختلاط، نرخ جذب آب را به کمتر از ۵ درصد کاهش می دهد و این عدد، مقدار مناسبی حتی در مناطق مرطوب است (Hall, 2006). هر چه خاک از نظر مواد چسباننده ضعیف‌تر باشد ترک های آن کمتر است و کمتر به چشم می‌آید و انعطاف آن در انطباق با کرنش بیشتر خواهد بود (وارن، ۱۳۸۷). مقاومت مجاز فشاری عناصر خاکی بین ۳ تا ۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع تشخیص داده شده است (مینکه، ۱۳۹۵، ۷۰). در پژوهش دیگری با عنوان ارزیابی انرژی دیوارهای خاک کوبیده با اندازه‌گیری‌های بلندمدت در محل، خانه‌ای از جنس خاک فشرده با توجه به فصل و جهت‌گیری‌های دیوار ارزیابی شده، نتایج حاصل از پژوهش بیانگر این است که در فصل تابستان به شرط ثبات دمای داخل، شرایط آسایش برقرار و در فصل زمستان با لحاظ کردن بارگرمایی بسیار کم، دما در محدوده‌ی آسایش باقی می‌ماند (Soudani,2017). در پژوهشی با عنوان عملکرد رطوبتی حرارتی دیوار خاک کوبیده در منطقه خود مختار تبتی در استان سیچوان چین که بر روی کارآیی رطوبتی، گرمایی دیوار خاک فشرده کار شده، نتایج، حاکی از آن است که مصالح خاک تغییرات دمایی و رطوبتی آرام و همچنین؛ پایداری حرارتی قابل توجهی دارند (Jiang, 2020). در تحقیق دیگری با عنوان تثبیت مکانیکی خاک و تبیین جایگاه آن در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک، بیان می کند تراکم و فشرده سازی خاک که منجر به تغییر در چگالی، مقاومت مکانیکی، تراکم پذیری، نفوذپذیری و تخلخل آن می‌شود، روشی است که خواص خاک را با اصلاح ساختار آن تغییر می دهد. بیانیه نورتون (Norton,1997) به وضوح نشان می‌دهد، خاک تثبیت شده تنها به معنی افزودن تثبیت کننده به خاک نبوده، بلکه کوبیدن نیز به تنهایی می‌تواند خاک را تثبین کند. لذا تثبیت مکانیکی نیز اهداف تثبیت کنندگی را محقق می کند (درمحمدی و رحیم‌نیا، ۱۳۹۶، ۳۴). درصورتی‌که نمونه از نوعی باشد که در آن خاک، فشرده شده باشد، نظیر خاک کوبیده و یا بلوک‌های خاکی، چگالی آن به حدود ۱۷۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌رسد (مینکه، ۱۳۹۵، ۳۸). مطابق با استاندارد آلمانی دی. آی. ان[۲]۴۱۰۲ درصورتی‌که چگالی خاک کمتر از ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نباشد، غیرقابل احتراق

است (مینکه، ۱۳۹۵، ۶۷). مطالعات پیشین و نمونه‌های اجرا شده ساختمان‌های خاک فشرده نشان می‌دهد این فناوری در قالب جدار ساختمانی استفاده شده است. پژوهش حاضر بیشتر با بررسی ویژگی های مکانیکی و حرارتی مصالح خاک فشرده و کمتر با بررسی ویژگی های رطوبتی و حریق مصالح سعی بر این دارد، الزامات بکارگیری بلوک خاک فشرده در ساختمان‌ها را بررسی کند و با ارائه ی نتایج آزمایشگاهی و مطالعات میدانی انجام شده، استفاده از مصالح فوق را به‌عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده در ساخت و سازها تبیین نماید. بنابراین، در بررسی پژوهش های پیشین اشاره به ویژگی های مکانیکی، حرارتی و رطوبتی مصالح مدنظر قرار گرفته است. معمولا در پژوهش‌های انجام شده، هر پژوهش به یک مورد خاص مانند مشخصه حرارتی، رطوبتی یا مکانیکی مصالح پرداخته شده است، اما در این مقاله توامان به نتایج مطالعات میدانی در تمامی بخش های مکانیکی، حرارتی، حریق و خواص مصالح اشاره شده تا بدین طریق، اجماعی در رابطه با بکارگیری مصالح خاک فشرده در ساختمان‌ها حاصل شود.

نوآوری پژوهش با مصالح بومی کشور ایران و منطقه یزد و تعیین درصدهای اختلاط مناسب مصالح با توجه به جنس خاک منطقه و استفاده از نوع و درصد افزودنی به‌عنوان مواد و مصالح چسباننده تبیین می‌شود. افزودنی‌ها در قالب چسباننده نقش موثری در پرکنندگی و استحکام بلوک مصالح دارند. چسباننده‌ها مانند سیمان سبب افزایش خواص مکانیکی مصالح می‌شوند. می‌توان به‌جای استفاده از سیمان از مواد و مصالح بومی هر منطقه در طرح اختلاط بلوک استفاده کرد و مقاومت فشاری بلوک خاک فشرده را افزایش داد. این راهکار هم سازگار با محیط‌زیست و فاکتورهای توسعه‌ی پایدار است هم اینکه تا حدودی سبب سبک شدن بلوک مصالح می‌شود. در این پژوهش به پرسش‌های زیر پاسخ داده خواهد شد.

- عوامل مکانیکی مصالح شامل چه مواردی هستند و درصد آن‌ها در طرح اختلاط مصالح چقدر است؟
- چگونه عوامل حرارتی در مصالح سبز ایفای نقش می‌کنند؟
- جهت بررسی مصالح ساختمانی با فناوری خاک فشرده چه فاکتورهایی به غیر از فاکتورهای حرارتی و مکانیکی باید مورد بررسی قرار گیرند؟

۲- مبانی نظری

این بخش به معرفی خاک و ویژگی‌های آن به‌عنوان مصالحی طبیعی و ساختمانی می‌پردازد. پس از معرفی خاک، به ویژگی‌ها و شاخص‌های مکانیکی خاک پرداخته و میزان تنش‌ها و مقاومت‌های مورد نیاز آن را بیان می‌کند. سپس شیوه‌های اصلاح و بهبود خصوصیات درونی خاک‌ها بیان شده و در ادامه به خاک فشرده توامان هم به عنوان مصالح ساختمانی و هم فناوری ساخت پرداخته و آن را شرح می‌دهد. در خلا موارد طرح شده در مورد اقتصاد انرژی و مزیت های حرارتی و انرژی مصالح خاک و فرآوردهای حاصل از این مصالح توضیحاتی ارائه می‌شود. همچنین، به شیوه تولید و عمل‌آوری مصالح با این فناوری ضمن ارائه درصدهای بهینه طرح اختلاط به همراه رطوبت مورد نیاز آن اشاره می‌کند.

۲-۱- معرفی خاک و ویژگی‌های آن

خاک یکی از مصالح طبیعی است که به وفور در دسترس است. زیرا ۷۴ درصد پوسته‌ی زمین را خاک رس و مواد مناسب برای معماری تشکیل داده است. به همین دلیل حمل و نقل آن ارزان است، انرژی کمتری هدر می‌رود و به تغییرات صنعتی هم نیاز ندارد. همچنین؛ تولید آن بدون آلودگی و در رشته کارخانه‌های غیرمتمرکز امکان‌پذیر است و درعین‌حال از قوانین پیچیده و انحصار تجاری پیروی نمی کند. اقتصاد استفاده از خاک نه غالب است و نه مغلوب. کاربرد آن حفظ تعادل چرخه‌ی حیات، اکرام محیط و زندگی را تضمین می کند. به‌دلیل کاربردهای فراوان این ماده امکان ایجاد اشتغال برای تعداد زیادی از کارگران کم تخصص بدین‌منظور فراهم می شود. همچنین، در نظام‌های خانوادگی و عملیات دقیق و پیشرفته می‌توان از آن استفاده کرد. مزیت دیگر در ساخت و ساز آسان و ایجاد شغل در کشورهایی است که با بحران بیکاری روبه‌رو هستند. خاک در احیای بعد مردمی نوآوری های محلی و منطقه ای و کاهش نابرابری‌های اجتماعی نقش بسزایی دارد. فرآیندهای محلی استفاده از خاک، پاسخی مناسب به تغییرات نیازهای واقعی و مستقیم جوامع، بدون وجود واسطه‌هاست. کاربرد خاک حق انتخاب آحاد گروه‌ها و یا ملیت‌ها را تقویت می‌کند. چراکه به‌وسیله‌ی آن می‌توان به استقلال فرهنگی و اقتصادی رسید. مزایای معماری با خاک با توجه به اقتصاد انرژی، در تمام مراحل ساخت معلوم است. اهمیت این ویژگی از این جهت است که در غرب انرژی مصرفی در این زمینه اعم از صنعتی و غیر صنعتی ۲۰ تا ۲۵ درصد مصرف ملی را تشکیل می‌دهد (دوتیه، ۱۳۷۹). از آنجایی که ساخت خشت از گل نیازی به پختن ندارد، نسبت به سایر مواد انرژی کمتری مصرف می‌کند (در این مرحله برای تولید آجر کوره‌ای با حدود

۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد گرما مورد نیاز است) و ازآنجایی‌که در محل تولید می‌شود تقریبا هزینه‌ای برای حمل و نقل ندارد. علاوه بر اقتصاد انرژی در هنگام تولید مصالح، بناهای ساخته شده از خاک در زمینه‌های حرارتی و تنظیم رطوبت و هوا مزایایی بدین صورت دارند که هم از اتلاف گرما جلوگیری می‌کنند و هم به‌دلیل تنظیم دما احساسی مطبوع به وجود می‌آورند (دوتیه، ۱۳۷۹).

۲-۲- ویژگی‌های مکانیکی مصالح خاکی

به مقاومت کششی گل در حالت خمیری «نیروی پیوستگی» گفته می‌شود. بر اساس استاندارد آلمانی دی آی ان ۱۸۹۵۲،[۳] گل باید دارای حداقل «استاندارد سختی» باشد. به‌طورکلی مقادیر نیروی پیوستگی در محدوده ۲۵ تا ۵۰۰ گرم بر سانتی‌مترمربع نوسان می‌کند (مینکه، ۱۳۹۵، ۶۷). مقاومت فشاری عناصر خشک ساختمانی ساخته شده از خاک، مثل خشت یا دیوارهای خاک کوبیده، در محدوده بین ۵ تا ۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترم ربع نوسان می‌کند. این مقاومت نه تنها به میزان و نوع رس موجود در خاک، بلکه به دانه بندی و توزیع سیلت، شن و ماسه و همچنین به نحوه آماده‌سازی و ورز دادن گل بستگی دارد. مقاومت مجاز فشاری عناصر خاکی بین۳ تا ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تشخیص داده شده است (مینکه، ۱۳۹۵، ۷۰). جدول ۱ به تنش مجاز فشاری دیوارهای از جنس خاک بر حسب وزن مخصوص آن‌ها اشاره دارد.

جدول ۱- تنش مجاز فشاری در دیوار گلی مطابق با استاندارد آلمانی دی.آی.ان. ۱۸۹۵۴ (مینکه، ۱۳۹۵)

وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	تنش فشاری مجاز دیوار (کیلوگرم برسانتی‌متر مربع)
۱۶۰۰	۲۰	۳
۱۹۰۰	۳۰	۴
۲۲۰۰	۴۰	۵

در رابطه با تأثیر محتوای رطوبت بر ویژگی‌های خاک فشرده، اولیویه و مسباح[۴] برای نخستین بار ایده استفاده از مفهوم مکش[۵] را به‌منظور بررسی نقش رطوبت در مصالح خاکی متراکم شده مطرح کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش محتوای رطوبت، مقدار مکش در مصالح خاکی متراکم شده کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای متاخرتر، ژاکین و همکاران، تأثیر مکش بر ویژگی‌های مکانیکی مصالح خاک فشرده را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مکش یکی از عوامل ایجاد مقاومت در خاک فشرده تثبیت نشده است و با کاهش محتوای رطوبت، مقاومت افزایش می‌یابد (Quoc et al., 2014, 164). مقاومت خاک ماسه‌ای در برابر باران کم است ولی درصورتی‌که ترک نداشته باشد در برابر یخ‌زدگی مقاوم است. گلی که میزان رس آن زیاد است، تمایل به ایجاد ترک های مویی دارد و بنابراین؛ مستعد یخ‌زدگی است. درصورتی‌که هیچ ترکی نداشته باشد، تقریبا ضد باران است. هر چقدر تعداد منافذ گل بیشتر و بزرگتر باشند، مقاومت گل به یخ‌زدگی بیشتر است. بنابراین؛ آجرهای معمولی که در کارخانه ساخته می‌شوند در برابر یخ‌زدگی مقاوم نیستند و در مناطق سرد، نباید در دیوارهای بیرونی به‌کار روند. در مقابل، خشت‌های گلی ماسه‌ای دست‌ساز به یخ‌زدگی مقاوم هستند (مینکه، ۱۳۹۵، ۵۷). با اضافه کردن فقط ۶ درصد سیمان در ترکیبات خاک فشرده می توان جذب رطوبت حداقلی را ایجاد کرد. بسته به چگالی خاک از ۲۰۵۰ تا ۲۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری آن از ۲,۳۳ تا ۴,۵۷ مگاپاسکال متغیر است (Hall, 2006). در مورد احتراق‌پذیری خاک فشرده با آزمایش هایی که در آزمایشگاه تحقیقات ساختمان[۶] انجام شد، مطابق با استاندارد آلمانی دی.آی.ان.۴۱۰۲ [۲] درصورتی‌که چگالی کاه گل یا خاک کمتر از ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نباشد، غیرقابل احتراق است (مینکه، ۱۳۹۵، ۵۷).

۲-۳- اصلاح و بهبود خصوصیات درونی خاک با عملیات و یا افزودنی‌های خاص

ترک‌هایی که در هنگام خشک شدن ایجاد می‌شوند به میزان آب، نوع و مقدار املاح معدنی رس و اندازه دانه‌ها و پراکندگی سنگ‌دانه‌ها بستگی دارد (مینکه، ۱۳۹۵، ۸۶). در واقع، افزودن ماسه یا شن دانه درشت‌تر به رس، موجب کاهش نسبت حجم رس شده و در نتیجه ضریب انقباض (ترک خوردگی حاصل از آبرفت) را کاهش می‌دهد. در این روش، گلی متشکل از ۵۰٪ رس و ۵۰٪ سیلت، با ماسه مخلوط شده و میزان ماسه در آن، آن‌قدر افزایش یافته تا ضریب انقباض، متمایل به صفر شود (مینکه، ۱۳۹۵، ۸۶). ضریب انقباض گل در هنگام خشک شدن را می‌توان با افزودن الیافی مانند پشم حیوانات، موی انسان، الیاف نارگیل، سیسل، بامبو، برگ‌های سوزنی درختان و تکه‌های کاه کاهش داد. این مسئله ناشی از آن است که با افزودن الیاف، نسبت حجمی رس در ترکیب کاهش یافته و بخشی از آب موجود در گل جذب منافذ الیاف می‌شود. از آنجا که نیروی پیوستگی ترکیب با اضافه

کردن الیاف افزایش می‌یابد، نهایتا پس از خشک شدن، ترک‌های کمتری قابل مشاهده است (مینکه، ۱۳۹۵، ۸۸). چسبندگی بعضی از خاک‌ها با روغن، الیاف یا بست‌هایی تامین می‌شود که سازوکار اتصال در آن از طریق وارد کردن مولکول‌های زنجیر بلند که به‌صورت بست عمل می‌کنند، ایجاد می‌شود (وارن، ۱۳۸۷، ۹۵). تثبیت‌کننده‌ها و مقاوم‌سازهای دیگری استفاده می‌شوند تا رفتار مکانیکی مصالح خاک فشرده را در فشار، کشش و برش افزایش دهند. موادی مانند خاکستر بادی، پسماندهای گرانیتی، الیاف نساجی و نوارهای پارچه ای مسلح شده در پژوهش‌ها و همچنین، در ساختمان‌ها استفاده شده است (Toufigh & Kianfar, 2019, 617). ساده‌ترین روش برای کاهش ترک‌های انقباضی در اجزای سازه‌های خاکی، کاستن طول عناصر و افزایش مدت زمان خشک شدن در آن‌ها است. یک روش منطقی دیگر، طراحی درزهای انبساط از پیش تعیین‌شده است تا بتوانند در حین خشک شدن انعطاف لازم را فراهم کرده و از ایجاد ترک‌های انقباضی ناخواسته جلوگیری کند. برای اجزاء گلی که بدون حفاظ در معرض شرایط جوی هستند، افزودن تثبیت‌کننده‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. به‌صورت تئوریک، رنگ‌های پوشاننده‌ی این اجزاء گلی، برای حفاظت آن‌ها در برابر رطوبت کافی است اما در عمل، بر سطح این اجزاء، ترک‌های ناشی از آبرفت و یا صدمات مختلف مکانیکی ایجاد می‌شوند. به‌علاوه، خطر نفوذ آب باران به داخل اجزاء گلی و ایجاد تورم و فرسایش وجود دارد (مینکه، ۱۳۹۵، ۸۸). افزودنی‌های مختلفی می‌توانند به ترکیبات خاک اضافه شوند و ویژگی‌های حرارتی دیوارهای خاک فشرده را بهبود ببخشند. مواد تغییر فازدهنده یا همان پی.سی.ام. ها و همچنین، پلی استایرن منبسط شونده ویژگی‌های حرارتی دیوار خاک فشرده را ارتقاء می‌دهند. این مواد به‌دلیل قیمت بالا و اثرات نامطلوبشان بر روی خواص مکانیکی خاک فشرده، افزودنی‌های مناسبی دیده نشده‌اند (Toufigh & Kianfar, 2019, 617). افزودنی‌های دیگر مانند مواد بازیافتی به‌عنوان پرکننده در خاک کوبیده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مواد مورد استفاده شامل خرده لاستیک، چوب پنبه و پشم شیشه هستند. تصاویر شبیه‌سازی شده از توزیع دما برای مواد پرکننده در سه بازه زمانی مختلف نشان می‌دهد، نرخ کلی انتقال حرارت کاهش یافته و در نمونه حاوی خرده لاستیک کمترین مقدار را دارد (Deepak Jain et al., 2019, 454). خصوصیات نارسایی حرارتی گل را می‌توان با افزودن مواد متخلخلی مانند کاه، نی، جلبک دریایی، چوب پنبه و دیگر مواد سبک گیاهی افزایش داد، همچنین؛ می‌توان ذرات معدنی کف مانند طبیعی یا مصنوعی، مانند سنگ پا، گدازه های آتشفشانی، گل منبسط‌شده، شیشه اسفنجی، پرلیت منبسط‌شده و مواد گیاهی اسفنجی مانند چوب پنبه را نیز به ترکیب گلی اضافه کرد. به‌علاوه، برخی پسماندها مانند خاک اره، تراشه‌های چوب و سبوس نیز می‌توانند به‌کار روند. اما به‌دلیل چگالی زیاد خاصیت عایق بودن در آن‌ها کمتر است. در نتیجه، هرچه مخلوط متخلخل‌تر باشد، سبک‌تر بوده و خاصیت نارسایی حرارتی بیشتری دارد (مینکه، ۱۳۹۵، ۱۰۳).

۲-٤- معرفی خاک فشرده و شیوه ساخت و عمل‌آوری بلوک‌های مصالح

خاک فشرده نوعی از مصالح با فناوری فشرده‌سازی خاک است که به‌عنوان مصالح ساختمانی سبز در صنعت ساختمان کاربرد دارد. در واقع بلوک خاکی فشرده صورت جدیدی از خشت یا بلوک گلی محسوب می‌شود که طی فرآیند متراکم‌سازی خاک ایجاد می‌شود. امکان ساخت بلوک‌های خاکی فشرده[۴] در مجاورت سایت به‌منظور صرفه‌جویی در زمان، هزینه و انرژی، عدم نیاز به مهارت خاص و امکان مشارکت افراد محلی در ساخت‌وساز و سایر ویژگی‌های زیست‌محیطی از مزایای این تکنیک به‌شمار می‌آید که منجر به محبوبیت زیاد آن در طی ۵۰ سال اخیر در میان کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه شده است (فرح زا و مهاجرانی، ۱۳۹۹، ۹۹). بلوک خاکی فشرده و شیوه تهیه آن در تصویر دیده می‌شود.



مجموعه تصاویر ۱- فرآیند تولید بلوک خاک فشرده (فرح زا و مهاجرانی، ۱۳۹۹)

اساس روش خاک کوبیده بر پایه کوبیدن است. خاک مرطوبی که ابتدا درون قالب ریخته می‌شود، ارتفاعی بین ۱۲ تا ۱۵ سانتی متر دارد، سپس با فرآیند کوبش فشرده می‌شود تا به ارتفاعی حدود ۷ سانتی‌متر برسد. عملیات کوبش باید از کناره‌ها شروع و به

سمت مرکز قالب ادامه یابد. کوبیدن خاک به دو روش دستی و دینامیکی قابل انجام است. غالبا در روش سنتی از کوبه‌ی دستی و در روش‌های پیشرفته‌تر از کوبههای برقی و پنوماتیک (بادی) استفاده می‌شود که هر یک از این روش‌ها ویژگی‌های خاصی دارند. در ضمن کوبش نباید موزون و هماهنگ باشد، چراکه خطر شکستن قالب‌بند وجود دارد و کوبش بیش از حد باعث جدا شدن مواد متشکله می‌شود، به‌ویژه درصورتی‌که مقدار رطوبت آن بالا باشد (وارن، ۱۳۸۷). به‌منظور ساخت بنا با این روش ترکیب مورد نظر خاک (خاک رس، شن و ماسه، تثبیت کننده) پس از مرطوب شدن، در یک ماشین فشرده‌سازی هیدرولیکی یا دستی قرار می‌گیرد تا بلوکهای فشرده تولید شود. بلوک‌های ساخته شده با این روش می‌توانند مستقیما در ساخت دیوار مورد استفاده قرار بگیرند، لذا نیازی به صرف زمان و در نتیجه فضای زیاد برای خشک شدن ندارند. این تکنیک به‌دلیل فشردن خاک مرطوب و استفاده از ۵ تا ۱۰ درصد سیمان به‌عنوان تثبیت‌کننده منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری خاک و همچنین بهبود عملکرد در برابر حضور رطوبت می‌شود (فرح‌زا و مهاجرانی، ۱۳۹۹، ۹۹). کوبیدن خاک زمانی متوقف می‌شود که بر اثر برخورد کوبه با خاک صدای ضربه‌های واضح و مشخصی شنیده شود. این کار نیازمند تجربه و مهارت است و این فرآیند تا رسیدن به بالای نمونه دیوار یا مصالح ادامه پیدا خواهد کرد. درصورتی‌که پس از باز کردن قالب ها پس از ۲۴ ساعت، اتصال ضعیف میان لایه‌های مختلف متراکم شده مشاهده شود، می‌توان ۵ درصد آهک به طرح اختلاط افزود، چون آهک، رس را تثبیت کرده و حساسیت ماده را نسبت به تغییرات رطوبت کاهش داد (Q.B.2009).

۲-۵- مصالح تشکیل دهنده، درصد بهینه مصالح و رطوبت مورد نیاز در دیوار خاک فشرده

مصالح دیوار خاک کوبیده از ماسه، شن و چسباننده تشکیل شده است. زمانی‌که از رس به‌عنوان چسباننده استفاده می‌شود یک خاک کوبیده تثبیت نشده به‌دست می‌آید و با افزودن موادی مانند سیمان یا آهک تثبیت می‌شود. مصالح خاک کوبیده معمولا با چگالی خشک حداکثری و میزان رطوبت بهینه متراکم می‌شوند (Toufigh & Kianfar, 2019, 617). رطوبت بهینه میان ۸ تا ۱۲ درصد جهت خاک‌های مختلف متفاوت است. خاک مناسب جهت ساخت و اجرای خاک کوبیده باید شامل ذرات با اندازه‌های مختلف باشد و توزیع اندازه ذرات در آن رعایت شده باشد. برخی مطالعات مشخص کردند که محدوده خاک‌های ریزدانه برای خاک کوبیده تثبیت شده با سیمان باید میان ۲۰ تا ۳۵ درصد و میزان شن آن نیز بیش از ۵۰ درصد باشد. پژوهش‌ها بیانگر آن است که محتوای شن و ماسه بیش از ۶۴ درصد نتایج مطلوبی نشان نمی‌دهند. مطالعات دیگری نشان داده است که معیارهایی به‌غیر از توزیع اندازه ذرات باید پیشنهاد شود تا خاک مناسبی به‌عنوان خاک کوبیده انتخاب شود. حداقل استحکام مواد در خاک کوبیده در محدوده‌ی یک تا دو مگاپاسکال است. همچنین؛ مطالعات انجام شده بر روی خاک کوبیده تثبیت شده با سیمان نشان داد که دوام آن به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و انقباض آن کاهش یافته است. استحکام خاک کوبیده تثبیت شده با سیمان به‌طور قابل توجهی بیش از معیار دو مگاپاسکال است. بنابراین؛ میزان سیمان باید محدود باشد تا نیازهای مقاومت و کارآیی استانداردها را برآورده سازد (حسنوندیان، ۱۳۹۸، ۲). نسبت‌های اختلاط جهت ساخت نمونه‌ها بر اساس مطالعات پیشین بدین صورت است. در پژوهشی با عنوان طراحی ترکیب خاک کوبیده تثبیت شده با سیمان و استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، درصدهای اختلاط بدین‌ترتیب است که از شن به میزان ۱۰ تا ۳۰ درصد، از ماسه به میزان ۴۰ تا ۶۷ درصد و از رس و لای به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد استفاده شده است (Anysz and Narloch, 2019, 20). در پژوهشی دیگر با عنوان ویژگی‌های رطوبتی گرمایی مصالح خام از جنس خاک درصدهای اختلاط مصالح خاک کوبیده را به دو صورت فاقد شن و دارای شن ارائه داده است. در صورت استفاده از شن، میزان آن ۲۰ درصد طرح اختلاط است و مابقی را ۱۵ درصد رس و ۶۵ درصد لای و ماسه تشکیل می دهد. در صورت عدم استفاده از شن در طرح اختلاط میزان ماسه تشکیل دهنده ۴۰ تا ۸۴ درصد و میزان رس و لای آن ۱۶ تا ۶۰ درصد است (Giada et al., 2019,10).

۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی است و بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی شکل گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی برای ساخت هشت نمونه بلوک خاک فشرده و با استفاده از خاک‌های منطقه یزد اعم از اکرم آباد، مریم آباد، میبد و دانشگاه انجام شد. در فرآیند دانه‌بندی خاک‌ها ، خاک اکرم آباد، مناسب‌ترین خاک برای ساخت بلوک خاک فشرده انتخاب شد. بنابراین، فرآیند ساخت و اندازه‌گیری فاکتورهای مکانیکی (مقاومت فشاری) و حرارتی (ضریب هدایت حرارت مصال) پیرامون خاک اکرم آباد انجام شده است. بدین‌صورت که ابتدا مطالعات درون آزمایشگاه اعم از دانه‌بندی خاک، تست‌های هیدرومتری و تراکم خاک انجام و داده‌ها

جمع‌آوری و تحلیل شده و تبدیل به نمودارها و جداول شده‌اند. جمع‌آوری داده‌ها به شکل دستی و تحلیل آن‌ها با نرم‌افزار صورت گرفته است. پس از ساخت نمونه‌ها، حدود شش هفته به آن‌ها فرصت داده تا کاملا خشک شوند و در ادامه مقاومت فشاری و مقاومت حرارتی جدار متشکل از مصالح اندازه‌گیری شد. سپس به‌منظور اعتبارسنجی داده‌های جمع‌آوری شده از یک فرد متخصص در هر بخش (بررسی فاکتورهای مکانیکی، سازه‌ای و حرارتی) به‌عنوان مشاور استفاده شده و صحت‌سنجی نتایج از طریق مقایسه با مطالعات پیشین انجام شده است.

۴- تحلیل داده‌ها

در اینجا ابتدا به تحلیل ویژگی‌های مکانیکی خاک، سپس به تحلیل ویژگی های و مشخصات خاک فشرده پرداخته می‌شود. در ادامه به معرفی و تحلیل فرآیند آزمایشگاهی مورد نیاز از ساخت بلوک خاک فشرده تا مقاومت در برابر حریق، عملکرد و دوام مصالح، اندازه گیری مقاومت فشاری، و ضریب هدایت حرارت مصالح پرداخته میشود. در فرآیند ساخت بلوک خاک فشرده تعیین نسبت‌های اختلاط با توجه به نوع خاک منطقه و مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط صورت می‌گیرد. با توجه به مطالعات پیشین و مطالعات میدانی انجام شده نسبت‌های اختلاط مصالح به‌دست آمده و در فرآیند ساخت بلوک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. پس از ساخت بلوک‌ها و خشک شدن آن‌ها، فاکتورهای حرارتی و مکانیکی مصالح اندازه گیری شده و در صورت نیاز راه حل بهینه‌سازی آن ارائه شده است.

٤-١- فرآیند آزمایشگاهی ساخت بلوک خاک فشرده

جهت انجام فرآیند آزمایشگاهی دانه‌بندی خاک‌ها، چهار خاک از منطقه‌ی یزد (خاک‌های اکرم آباد، مریم آباد، میبد و دانشگاه) انتخاب و دانه‌بندی شدند با توجه به دانه‌بندی هر خاک و درصد عبوری از الک مورد نظر، خاک اکرم آباد جهت دانه‌بندی و ساخت نمونه‌ها در این پژوهش انتخاب شد. اکرم آباد در استان یزد و در محدوده شرقی شهر یزد واقع شده است.

آزمایش دانه‌بندی خاک به منظور پوشش سایزهای مختلف یک خاک از نظر ابعاد و اندازه در دانه‌بندی آن انجام می‌شود. جهت انجام فرآیندهای آزمایشگاهی، خاک اکرم آباد در استان یزد به‌دلیل ریزدانه بودن انتخاب شده است. از خاک اکرم آباد که خاکی ریزدانه و از نوع رسی است. به مقدار ۵۰۰ گرم برداشته شده و مراحل دانه‌بندی مربوطه انجام شد. اطلاعات مربوط به دانه‌بندی خاک در جدول ۲ آورده شده است.



مجموعه تصاویر ۲- فرآیند دانه بندی خاک اکرم آباد- وزن کردن خاک (بالا راست)؛ مرطوب کردن خاک (بالا چپ)؛ افزودن آب (پایین راست) و گذراندن خاک از الک‌ها (پایین چپ)

جدول ۲– دانه‌بندی خاک اکرم آباد

خاک اکرم آباد	وزن کل (گرم)	نمره الک (میلی متر)	مانده روی الک (گرم)	عبوری از الک (گرم)	درصد عبوری
ریزدانه	۵۰۰	۲,۳۶	۱۰	۰,۹۸	۹۸
ریزدانه	۵۰۰	۱,۱۸	۲۹	۰,۹۲۲	۹۹,۲
ریزدانه	۵۰۰	۰,۶	۲۳	۰,۸۷۶	۸۷,۶
ریزدانه	۵۰۰	۰,۳	۲۵	۰,۸۲۶	۸۲,۶
ریزدانه	۵۰۰	۰,۱۵	۶۴	۰,۶۹۸	۶۹,۸
ریزدانه	۵۰۰	۰,۰۷۵	۸۴	۰,۵۳	۵۳

خاک اکرم آباد به‌دلیل ریزدانه بودن و درصد مناسب عبوری از تمامی شماره الک‌ها جهت استفاده در تولید مصالح خاک فشرده کاربرد دارد. وزن خاک انتخاب شده جهت دانه‌بندی ۵۰۰ گرم است. الک‌ها از نمره ۲,۳۶ میلی‌متر تا ۰,۰۷۵ میلی‌متر انتخاب شده‌اند تا سایزهای مختلف را پوشش دهند. در هر نمره الک میزان گرم مانده روی الک و عبوری از الک در جدول درج شده و در انتها درصد عبوری از هر نمره الک درج شده است. در ادامه فرآیند به دانه‌بندی ماسه به‌عنوان پر کننده و مصالح کنترل ترک و شکست در فرآیند تولید مصالح خاک فشرده پرداخته می شود. وزن ماسه انتخاب شده جهت دانه‌بندی ۵۰۰ گرم است. با توجه به درشت تر بودن ماسه نسبت به خاک، ابعاد الک‌ها از نمره ۴,۷۵ میلیمتر تا ۰,۰۷۵ میلی‌متر انتخاب شده‌اند تا سایزهای مختلف را پوشش دهند. در هر نمره الک میزان گرم مانده روی الک و عبوری از الک در جدول درج شده و در انتها درصد عبوری از هر نمره الک درج شده است. نتایج دانه‌بندی ماسه شسته در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- نتایج دانه‌بندی ماسه

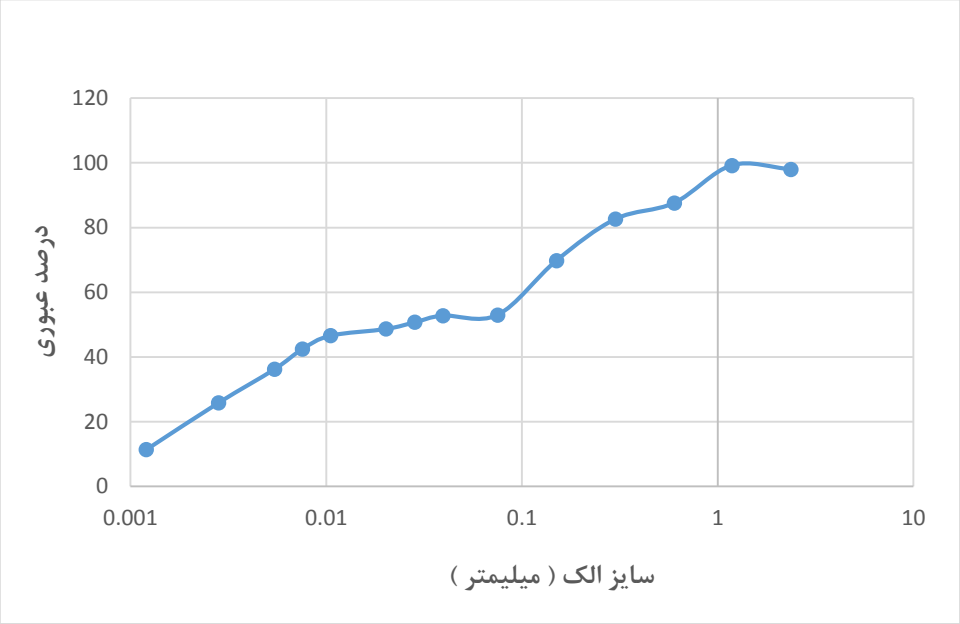
ماسه	وزن کل (گرم)	نمره الک (میلی متر)	مانده روی الک (گرم)	عبوری از الک (گرم)	درصد عبوری
میان دانه	۵۰۰	۴,۷۵	۱۶	۰,۹۶۸	۹۶,۸
میان دانه	۵۰۰	۲,۳۶	۱۲۳	۰,۷۲۲	۷۲,۲
میان دانه	۵۰۰	۱,۱۸	۱۲۸	۰,۴۶۶	۴۶,۶
میان دانه	۵۰۰	۰,۶	۱۱۲	۰,۲۴۲	۲۴,۲
میان دانه	۵۰۰	۰,۳	۷۴	۰,۰۹۴	۹,۴
میان دانه	۵۰۰	۰,۱۵	۳۰	۰,۰۳۴	۳,۴
میان دانه	۵۰۰	۰,۰۷۵	۷	۰,۰۲	۲

آزمایش هیدرومتری بخشی از آزمایش دانه‌بندی است که جهت تعیین اندازه خاک‌های بسیارریزدانه که عبوری از الک شماره ۲۰۰ هستند انجام می‌شود. طبق قرائت‌های انجام شده و قرار دادن اطلاعات در فرمول‌های مربوطه محاسبات هیدرومتری انجام و آزمایش دانه‌بندی تکمیل شد. در آزمایش هیدرومتری دو استوانه به نام‌های شاهد و خاک وجود دارد که استوانه شاهد شامل هیدرومتر دورن آب است و استوانه خاک شامل مخلوط آب و خاک است. در دقیقه‌های ۱، ۲، ۴، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۲۴۰ و ۱۴۴۰ گرم بر لیتر خاک استوانه شاهد و استوانه شامل خاک یادداشت شده و با قرار دادن دماسنج کنار استوانه، دمای آن نیز ثبت می‌شود. داده‌های مربوط به آزمایش هیدرومتری در جدول ۴ آمده است.

جدول ٤- نتایج آزمایش هیدرومتری خاک اکرم آباد

قرا ئت‌های هیدرومتری خاک اکرم آباد - مشخصات چگالی سنج: ۱۵۲ هیدرومتر			
زمان (دقیقه)	قرائت شاهد (گرم در لیتر خاک)	قرائت استوانه (گرم در لیتر خاک)	دمای استوانه (درجه سانتیگراد)
۱	۷	۳۶	۳۱
۲	۶	۳۵	۳۱
٤	۷	۳۴	۳۱
۱۵	۷	۳۳	۳۱
۳۰	۶	۳۱	۳۱
٦۰	۶	۲۸	۳۰/۵
۲٤۰	۶	۲۳	۳۱
۱٤٤۰	۶	۱۶	۳۰/۵

نمودار دانه‌بندی خاک براساس سایز الک و درصد عبوری از هر الک ترسیم می‌شود. با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری، نمودار دانه‌بندی خاک اکرم آباد به شرح زیر است. طبق نمودار، نمره الک از ۰,۰۷۵ تا ۴,۷۵ میلی‌متر برای ماسه و از ۰,۰۷۵ تا ۲,۳۶ میلی‌متر برای خاک متغیر است. درصد عبوری خاک رس از ۵۳ تا ۹۸ و درصد عبوری ماسه از ۲ تا ۹۶,۸ درصد متغیر است. تصویر ۳ نمودار دانه‌بندی خاک اکرم آباد را نشان می‌دهد.



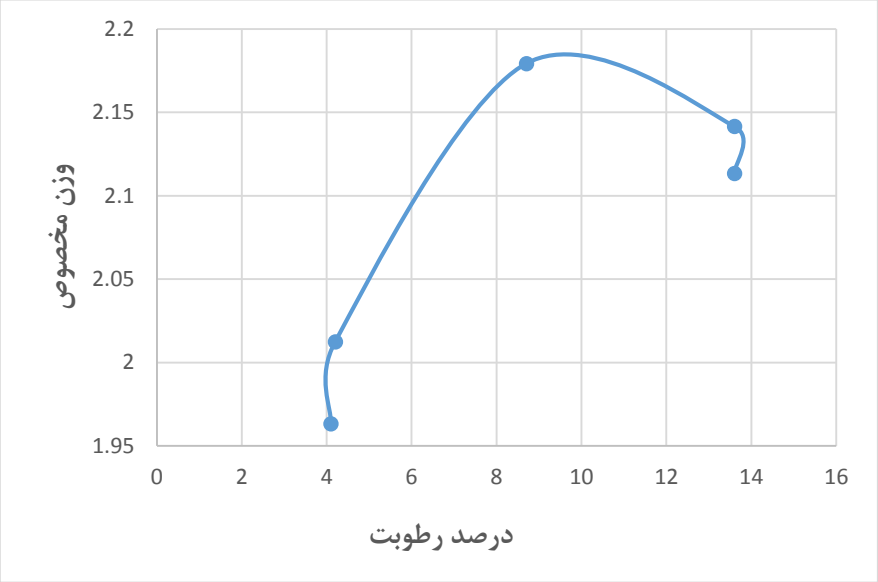
تصویر ۳- نمودار دانه‌بندی خاک اکرم‌آباد

٤-۲- انجام آزمایش تراکم خاک اکرم آباد: آزمایش تراکم خاک جهت تعیین رطوبت بهینه ی خاک مورد نظر جهت ساخت مصالح انجام می‌شود. در این آزمایش ابتدا وزن قالب مشخص می‌شود. سپس وزن مشخصی از خاک برداشته شده به صورت ملات عمل آوری می‌شود و درون قالب ریخته شده و مجدد وزن آن ثبت می‌شود. در ادامه حدود ۱۰۰ گرم از ملات برداشته شده و در آون قرار داده می‌شود، پس از آن وزن خشک نمونه محاسبه شده و با قرار دادن در فرمول مربوط میزان رطوبت خاک مشخص می‌شود. اطلاعات نمونه در آزمایش تراکم خاک در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵ – اطلاعات نمونه در آزمایش تراکم خاک

مرحله	وزن قالب (کیلوگرم)	وزن قالب و خاک (کیلوگرم)	وزن خاک (کیلوگرم)	وزن نمونه قرار داده شده در آون (کیلوگرم)	وزن نمونه پس از خشک شدن (کیلوگرم)	میزان رطوبت (کیلوگرم)	میزان رطوبت (درصد)
۱	۴/۳۹۸	۶/۳۱۵	۱/۹۱۷	./۱۰۲	۰/۰۹۸	۰/۰۴۱	۴/۱
۲	۴/۳۹۸	۶/۳۶۵	۱/۹۶۷	./۱۰۰	۰/۰۹۶	۰/۰۴۲	۴/۲
۳	۴/۳۹۸	۶/۶۲۰	۲/۲۲۲	./۱۰۰	۰/۰۹۲	۰/۰۸۷	۸/۷
٤	۴/۳۹۸	۶/۶۸۰	۲/۲۸۲	./۱۰۰	۰/۰۸۸	۰/۱۳۶	۱۳/۶
۵	۴/۳۹۸	۶/۶۵۰	۲/۲۵۲	./۱۰۰	۰/۰۸۸	۰/۱۳۶	۱۳/۶

نمودار تراکم خاک اکرم آباد: نمودار تراکم خاک بر اساس درصد رطوبت و وزن مخصوص خاک ترسیم می شود و به صورت زیر نمایش داده می شود. با توجه به نمودار، رطوبت بهینه ی خاک اکرم آباد جهت ساخت نمونه ها حدود نه درصد (بیشتر از هشت و کمتر از نه درصد) می باشد. در عملیات ساخت نمونه ها رطوبت هشت درصد کافی به نظر رسیده و ساخت آن ها با این عدد صورت گرفته است. رطوبت جدول عدد بهینه است و قابلیت تزریق بیش از این مقدار تا ۱۰ درصد را دارد. بیش از ۱۰ درصد بسته به جنس خاک و اقلیم در شرایط خاص تا ۱۲ درصد امکان پذیر است.



تصویر ٤ – نمودار تراکم خاک اکرم آباد

٤-۳- نتایج فرآیند آزمایشگاهی دانه‌بندی خاک جهت کاربرد در ساخت نمونه‌ها

- با توجه به آزمایش دانه‌بندی، جهت ساخت بلوک خاک فشرده، خاک اکرم آباد به‌دلیل ریزدانه بودن و تراکم مناسب در سطح مصالح و ماسه شسته به جهت تثبیت و استحکام استفاده می‌شود.
- جهت ایجاد چسبندگی میان اجزای مصالح، دست یافتن به مقاومت فشاری مناسب و مقاومت در برابر رطوبت، استفاده از ۳ تا ۵ درصد مصالح سیمان کفایت می‌کند. در شرایطی که مصالح کاملا سبز است، می‌توان مصالح سیمان را حذف و با تغییر در دانه‌بندی خاک رس و ماسه مقاومت فشاری لازم را ایجاد کرد.
- آزمایش تراکم خاک جهت تعیین رطوبت بهینه‌ی خاک مورد نظر انجام می‌شود. با توجه به نمودار، رطوبت بهینه‌ی خاک اکرم آباد جهت ساخت نمونه‌ها حدود نه درصد (بیشتر از هشت و کمتر از نه درصد) است. در عملیات ساخت

نمونه‌ها رطوبت هشت درصد کافی بهنظر رسیده و ساخت آن‌ها با این عدد صورت گرفته است. درصد رطوبت مورد نیاز با توجه درصدهای اختلاط مصالح مصرفی تا میزان یک الی دو درصد تغییر داشته باشد.

٤-٤- ساخت نمونه‌ها با استفاده از نتایج حاصل شده از آزمون‌های دانه‌بندی و تراکم خاک

جهت آشنایی با فرآیند ساخت و میزان درصد های اختلاط، دو نمونه ساخته شد که اطلاعات فرآیند ساخت آن ها به تفکیک در جداول مربوطه آمده است.

- **اطلاعات نمونه اول:** در ساخت نمونه اول از خاک اکرم آباد ۴۲,۵ درصد، ماسه به میزان ۵۵ درصد، سیمان ۲,۵ و آب ۷ درصد استفاده شده است. ابتدا ملات با درصدهای ذکر شده ساخته شده و سپس لایه‌لایه درون قالب ریخته و کوبیده می‌شود. پیش از ریختن ملات، جدارهای قالب چرب می‌شوند تا مصالح به آن‌ها نچسبد. پس از ریختن ملات و کوبیدن آن تا لایه آخر می‌توان قالب را باز و مصالح را خارج کرد. به جهت تاکید بر سبز بودن مصالح از حداقل مقدار سیمان استفاده شده است. اطلاعات نمونه ساخته شده در جدول ۶ آمده است.

جدول ٦– اطلاعات ساخت نمونه اول

وزن کل – ٦/٥ کیلوگرم- میزان آب ۷ درصد وزن کل است.				
نمونه خاک کوبیده	**خاک اکرم آباد (رس + لای)**	**ماسه**	**سیمان**	**آب**
درصد تشکیل دهنده	۴۲/۵	۵۵	۲/۵	۷
وزن تشکیل دهنده (کیلوگرم)	۲/۷۶۳	۳/۵۷۵	۰/۱۶۲	۰/۴۵۵

در ساخت نمونه اول از خاک اکرم آباد به میزان ۲,۷۶ کیلوگرم انتخاب شده، ماسه طرح اختلاط کمی بیشتر و به میزان ۳,۵۷ کیلوگرم انتخاب شده است. نسبت وزن ماسه به خاک در طرح اختلاط برابر با ۱,۲۹ است. همان‌طورکه در جدول مشخص است ۱۲,۵ درصد میزان ماسه بیشتر از میزان خاک تشکیل‌دهنده است. سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط به میزان حداقل و به وزن ۰,۱۶۲ کیلوگرم است. آب مورد استفاده با وزن ۰,۴۵۵ کیلوگرم به‌کار برده شده و جهت مرطوب کردن مصالح کافی به‌نظر رسیده است. ممکن است در خاک‌های مناطق مختلف این عدد تا حدودی تغییر کند و تا حدودی بیشتر باشد.



مجموعه تصاویر۵– مراحل ساخت نمونه اول–شروع از بالا چپ به راست

- **اطلاعات نمونه دوم:** در این نمونه از خاک شنی به میزان ۱۰ درصد، ماسه ۵۰ درصد، خاک اکرم آباد ۳۷,۵، سیمان ۲,۵ . آب ۸ درصد استفاده شده است. در اینجا مقداری شن نیز به ترکیب ملات اضافه شده است. با توجه به دانه‌بندی خاک و ماسه می‌توان در صورت نیاز از مقداری شن جهت تکمیل دانه‌بندی ملات مصالح استفاده کرد. اطلاعات نمونه در جدول ۷ قابل مشاهده است.

جدول ۷– اطلاعات نمونه دوم

وزن کل = ٦/٥ کیلوگرم– میزان آب ۸ درصد وزن کل است.					
نمونه خاک کوبیده	**خاک دانشگاه (شن + ماسه)**	**خاک اکرم آباد (رس + لای)**	**ماسه**	**سیمان**	**آب**
درصد تشکیل دهنده	۱۰	۳۷/۵	۵۰	۲/۵	۸
وزن تشکیل دهنده (کیلوگرم)	۰/۶۵۰	۲/۴۳۸	۳/۲۵۰	۰/۱۶۲	۰/۵۲۰

در ساخت نمونه دوم به میزان ۰,۶۵۰ کیلوگرم از خاک شنی سایت دانشگاه یزد و از خاک اکرم آباد به میزان۲,۴۳۸ کیلوگرم انتخاب شده، ماسه طرح اختلاط کمی بیشتر و به میزان ۳,۲۵۰کیلوگرم انتخاب شده است. نسبت وزن ماسه به خاک در طرح اختلاط برابر با ۱,۳۳ است. همان‌طورکه در جدول مشخص است ۱۲,۵ درصد میزان ماسه بیشتر از میزان خاک تشکیل‌دهنده است. سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط به میزان حداقل و به وزن ۰,۱۶۲ کیلوگرم است. آب مورد استفاده جهت مرطوب کردن مصالح با وزن ۰,۵۲۰ کیلوگرم به کار برده شده است. میزان آب مورد استفاده تقریبا برابر با عدد بهینه رطوبت مورد نیاز طرح اختلاط است.



مجموعه تصاویر ٦– مراحل ساخت نمونه دوم

- **اطلاعات نمونه سوم:** در این نمونه از خاک شنی به میزان ۱۰ درصد، خاک میبد ۴۰ درصد و ۵۰ درصد ماسه تشکیل شده است. آب به میزان ۸ درصد ترکیب به آن اضافه شده است. در این ترکیب، خاک شنی از خاک دانشگاه

و خاک رسی از خاک میبد انتخاب شده است. در ادامه در جدول ۸ درصد اختلاط مصالح و وزن تشکیل‌دهنده‌ی آن آمده است.

جدول ۸- اطلاعات نمونه سوم

وزن کل = ۷ کیلوگرم- میزان آب ۸ درصد وزن کل است.				
نمونه خاک کوبیده	**خاک دانشگاه (شن + ماسه)**	**خاک میبد (رس + لای)**	**ماسه**	**آب**
درصد تشکیل‌دهنده	۱۰	۴۰	۵۰	۸
وزن تشکیل‌دهنده (کیلوگرم)	۰/۷	۲/۸	۳/۵	۰/۵۶۰

در ساخت نمونه سوم به میزان ۰,۷کیلوگرم از خاک شنی سایت دانشگاه یزد، ۲,۸ کیلوگرم از خاک میبد انتخاب شده، ماسه طرح اختلاط بیشتر از خاک تشکیل‌دهنده و به میزان ۳,۵ کیلوگرم انتخاب شده است. نسبت وزن ماسه به خاک در طرح اختلاط برابر با ۱,۲۵ است. همان‌طورکه در جدول مشخص است میزان ماسه ۱۰ درصد بیشتر از میزان خاک تشکیل‌دهنده است. سیمان نیز در این نمونه استفاده نشده و میزان آب مورد استفاده کمی بیشتر از نمونه‌های قبلی است. آب مورد استفاده جهت مرطوب کردن مصالح با وزن ۰,۵۶۰ کیلوگرم به‌کار برده شده است. میزان آب مورد استفاده تقریبا برابر با عدد بهینه رطوبت مورد نیاز طرح اختلاط و ۸ درصد است. با توجه به اینکه هشت نمونه از بلوک مصالح با خاک‌های منطقه‌ی یزد ساخته شده، نسبت‌های اختلاط نمونه‌های چهارم تا هشتم به شرح زیر در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹- نسبت‌های اختلاط نمونه‌های چهارم تا هشتم

نمونه بلوک مصالح	ابعاد بلوک (سانتی‌متر)	خاک دانشگاه (درصد)	خاک میبد (درصد)	خاک اکرم آباد (درصد)	ماسه (درصد)	سیمان (درصد)	میزان آب افزوده شده نسبت به کل حجم مصالح (درصد)
نمونه چهارم	۱۵*۱۵*۱۵	۱۰		۳۷,۵	۵۰	۲,۵	۸
نمونه پنجم	۱۵*۱۵*۱۵		۴۲,۵		۵۵	۲,۵	۷
نمونه ششم	۱۵*۱۵*۱۵	۱۵		۴۲	۴۰	۳	۸
نمونه هفتم	۱۵*۱۵*۱۵	۱۵	۴۲		۴۰	۳	۸
نمونه هشتم	۱۵*۱۵*۱۵	۱۰		۳۷,۵	۵۰	۲,۵	۸

٤-٥- مقاومت فشاری

پیرامون ساخت و ساز با خاک کوبیده و کارآیی سازه‌ای آن در کشور ایران پژوهشی با عنوان کارآیی لرزه ای دیوارهای ثابت شده و ثابت نشده خاک کوبیده در آزمایشگاه گروه مهندسی عمران دانشگاه یزد انجام شده است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که افزایش فشار محوری کارآیی صفحات دیوار را از وضعیت برشی به موجی برشی تغییر می‌دهد. همچنین مقاومت لرزه‌ای در صفحه‌ی دیوار خاک کوبیده ثابت نشده درحالی‌که تنش قائم از ۰,۱ تا ۰,۵ مگاپاسکال افزایش یافته تا ۴۴,۶٪ بهبود یافته است (Ramezanpour et al., 2021,12). در خارج از ایران پژوهش‌هایی در این خصوص انجام شده که در ادامه به آن‌ها اشاره می شود. در یک پژوهش که با عنوان کارآیی حرارتی و سازگاری در برابر یخبندان ساختمان خاک کوبیده انجام شده نتیجه نشان داد که مقدار ماسه و شن برابر با ۵۰ درصد به‌منظور ایجاد استحکام لازم در سازه پاسخگو است و مقدار رس و لای کمی بالاتر یا مشابه همین حدود است و مقاومت فشاری لازم یعنی دو مگاپاسکال را ارائه می‌دهد (Tinsley & Pavia, 2019, 12). در پژوهشی دیگر که با عنوان تثبیت شیمیایی خاک کوبیده با استفاده از باقی‌مانده‌های کلسیم کاربید و خاکستر انجام شده، نتیجه نشان داد که در خاک‌های شامل ۱۲ درصد مواد چسباننده، مقاومت فشاری رشد قابل توجهی داشته و تثبیت شیمیایی تکنیک مهمی جهت بهبود ویژگی خاک طبیعی برای ساختمان‌های پایدار در مقیاس کوچک است (Siddiqua & Barreto, 2018, 371). در پژوهش دیگری با عنوان پیشرفت هایی در زمینه‌ی ارزیابی مناسب بودن خاک برای سازه خاک کوبیده، نتیجه نشان داد که هیچ کدام از نمونه‌های تثبیت نشده دارای حداقل مقاومت فشاری قابل انتظار یعنی یک مگاپاسکال نیستند این در حالی است که تمام نمونه‌های تثبیت شده با سیمان ضمن اینکه الزامات طرح اختلاط را دارا هستند، از مقاومت فشاری پیشنهاد شده

بزرگتر یا مساوی دو مگاپاسکال برخوردار هستند. حتی مقاومت در برخی نمونه‌ها به‌طور فزاینده‌ای بیش از حدود پیشنهاد شده گزارش شده است (Ciancio et al., 2013, 46). در مقاله‌ای با عنوان بهینه سازی سه ترکیب جدید از خاک کوبیده تثبیت شده حاوی مواد تغییر فاز دهنده (پی سی ام): مشخصه یابی خواص حرارتی و ارزیابی چرخه عمر، با توجه به درصدهای اختلاط مورد استفاده، تثبیت‌کننده‌های فیزیکی و شیمیایی و درصد پی.سی.ام.، مقاومت فشاری نمونه‌ها از ۲,۸۶ تا ۴,۸۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع متغیر است (Serrano et al., 2012, 465). در ادامه مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج آن به شرح زیر است.

- محاسبه مقاومت فشاری نمونه‌ها: اطلاعات نمونه‌ها از جداول ۶ تا ۸ قابل دریافت است. در متن به اطلاعات نمونه‌ها اشاره شده است. با توجه به اینکه نمونه‌های ساخته شده از خاک‌های میبد و اکرم آباد است و درصدهای اختلاط در میان آن‌ها جابه‌جا شده است. به‌صورت تصادفی سه نمونه از میان نمونه‌ها جهت انجام آزمون مقاومت فشاری انتخاب شده و نتایج آن در جدول ۱۰ قابل مشاهده است.

مساحت جسم/((۲,۰۵۱) + (عددقبل اعمال بار–عددبعد اعمال بار) * (۰,۹۵۱)) =مساحت جسم/ نیرو وارد شده=مقاومت فشاری

جدول ۱۰– مقاومت فشاری نمونه‌ها

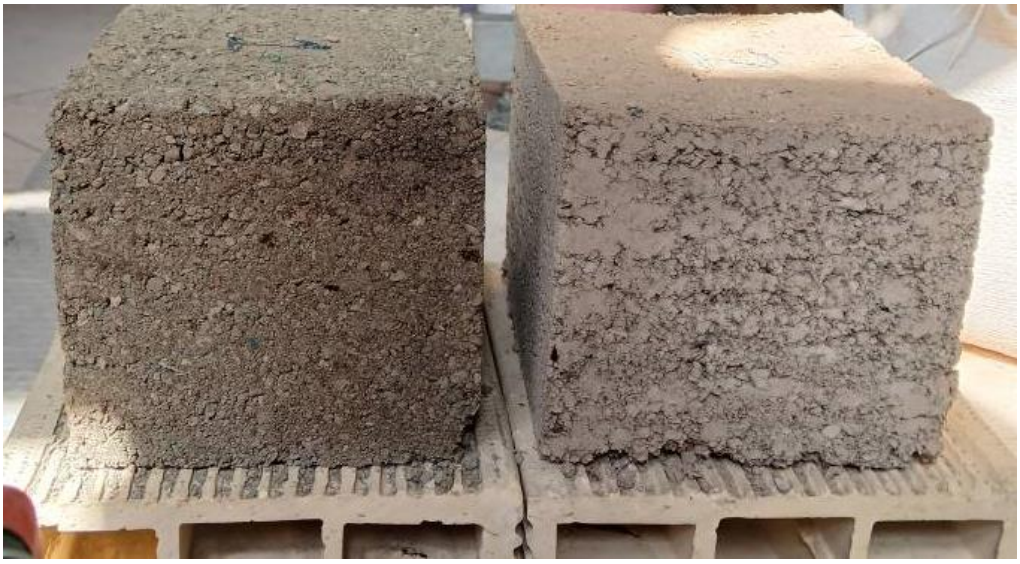
نمونه	ابعاد نمونه (سانتی متر)	قبل از اعمال بار (کیلو نیوتن)	بعد از اعمال بار (کیلو نیوتن)	مقاومت فشاری (نیوتن بر میلی متر مربع)
اول	۱۵*۱۵*۱۵	۲۳	۸۵,۵	۲,۷۳
دوم	۱۵*۱۵*۱۵	۲۳,۱	۱۱۲,۱	۳,۸۵
سوم	۱۵*۱۵*۱۵	۲۲,۴	۱۰۸,۳	۳,۷۲

طبق آیین نامه مقررات ملی ساختمان، مبحث هشتم (طرح و اجرای ساختمان های با مصالح بنایی) در بخش مشخصات مصالح و کنترل کیفیت، ارزیابی مقاومت فشاری مشخصه واحد بنایی مدنظر است. در اینجا مقاومت فشاری مشخصه واحد بنایی، حداقل مقاومت فشاری در نظر گرفته شده در طراحی برای واحد بنایی است. ارزیابی مقاومت فشاری مشخصه واحد بنایی بر مبنای یکی از دو روش آزمایش نمونه و روش تخمین انجام می‌شود (مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث هشتم، ۴۲). در این پژوهش برای تعیین مقاومت فشاری بلوک‌ها از آزمایش نمونه استفاده شده است. طبق جدول مقاومت فشاری مشخصه واحد بنایی بر حسب مقاومت فشاری آجر رسی، مقاومت فشاری مشخصه آجر حداقل ۳ مگاپاسکال است که ۱ تا ۱,۴ مگاپاسکال آن مربوط به مقاومت فشاری ملات مورد استفاده است. بنابراین، مقاومت فشاری جزء بنایی حداقل ۲ مگاپاسکال است (مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث هشتم، ۴۴). در ادامه آزمایش‌های عملکرد در برابر آتش، عملکرد دوام، محیطی و خواص مصالح و عملکرد حرارتی مصالح به شرح زیر است.

٤-٦- عملکرد در برابر حریق

در آزمایش مقاومت و عملکرد مصالح در برابر آتش، دو نمونه از بلوک مصالح (نمونه شماره ۱: بلوک مصالح با درصد بیشتر خاک رس. نمونه شماره ۲: بلوک مصالح با درصد بیشتر ماسه) با درصد های اختلاط متفاوت در برابر شعله‌ی مستقیم آتش قرار گرفته‌اند. پس از گذشت یک ساعت از قرار گرفتن مستقیم جسم مصالح در برابر آتش فقط جبهه‌ی بیرونی آن‌ها داغ شده و دمای آن‌ها به‌حدی رسیده که دست را می‌سوزاند ولی تاثیری در شکل ظاهری یا فرم مصالح ایجاد نشده است. میزان عبور گرما و حرارت از جسم مصالح به اندازه‌ی ۲ سانتی‌متر از ۱۵ سانتی‌متر ضخامت مصالح است. روند حرارت‌دهی ادامه یافته و پس از گذشت دو ساعت از قرار گرفتن مستقیم جسم مصالح در برابر آتش، کم کم تغییر رنگ در جدار بیرونی نمونه شماره ۲ حاصل می‌شود. این در حالی است که تغییری در ظاهر نمونه شماره ۱ مشاهده نمی‌شود و نفوذ گرما از جسم مصالح نمونه‌ها به ۴ سانتی متر از ۱۵ سانتی‌متر می‌رسد. در سه ساعت پس از گذشت حرارت‌دهی به جسم مصالح، همچنان تغییری در شکل ظاهری و فرم نمونه شماره ۱ مشاهده نشده ولی نمونه شماره ۲ در جبهه‌ی بیرونی آن کمی تغییر رنگ مشاهده می‌شود. میزان عبور حرارت از جسم مصالح حدود ۶ سانتی متر از ۱۵ سانتی‌متر است. با توجه به نتایج آزمایش انجام شده طی ۳ ساعت و مشاهدات صورت گرفته با گذشت هر یک ساعت از آزمایش ضخامت ۲ سانتی‌متر از جسم مصالح تحت تاثیر حرارت عبور یافته قرار می‌گیرد.

بنابراین؛ حدود ۷٫۵ ساعت طول می‌کشد تا آتش به‌طورکامل از ضخامت مصالح عبور کرده و جبهه‌ی داخلی مصالح را تحت تاثیر قرار دهد. در نهایت با توجه به اینکه در جبهه‌ی بیرونی مصالح تا ۲ ساعت تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشده است می‌توان گفت، مقاومت مصالح خاک فشرده در برابر حریق تا ۲ ساعت است و پس از آن به تدریج تغییرات در جسم مصالح آغاز می‌شود. تصویر ۷ تغییرات نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



تصویر ۷– نمونه شماره ۱ (سمت راست)؛ نمونه شماره ۲ (سمت چپ)

٤-۷- عملکرد دوام/ محیطی/ خواص مصالح

نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه با درصدهای اختلاط مختلف در مرحله‌ی اول ۴۵ روز و در مرحله‌ی دوم ۱۲۰ روز در محیط آزمایشگاه و در فضای آزاد در برابر عوامل محیطی و جوی قرار گرفته و تاثیری در خواص مصالح آن‌ها ایجاد نشده است. تثبیت مکانیکی مصالح با افزودنی‌هایی مانند سیمان اتفاق می‌افتد. برای افزایش مقاومت مصالح خاکی می‌توان با افزایش فشار و تراکم و بدون استفاده از تثبیت‌کننده‌ها دانه‌های خاک را متراکم‌تر نمود، در نتیجه بلوکی با تراکم متوسط و موئینگی مناسب به وجود آورد. ازآنجاکه مقاومت خاک رابطه مستقیمی با درجه تراکم ذرات و در نتیجه با جرم ماده در واحد حجم دارد لذا ایده فشرده‌سازی و تراکم در مصالح با توجه به نیاز به بهبود کیفیت مصالح و دوام ساختمان‌ها و در راستای بهره‌وری بیشتر به‌وجود آمده است (درمحمدی و رحیم نیا، ۱۳۹۶، ۳۵). خواص مصالح تا حدودی متاثر از دانه‌بندی مصالح، درصد اختلاط مواد و مصالح تشکیل دهنده‌ی بلوک و میزان فشرده‌سازی مصالح است. قابل توجه است که این افزایش تراکم منجر به افزایش قابل توجهی در توان باربری، مقاومت فشاری و مقاومت بلوک‌ها در برابر فرسایش و کاهش آسیب‌پذیری نسبت به رطوبت می‌شود (درمحمدی و رحیم‌نیا، ۱۳۹۶، ۳۵). بنابراین، درصورتی‌که نمای ساختمان در معرض باران قرار گیرد، پس از اتمام باران و برطرف شدن رطوبت، جسم مصالح خشک شده و مقاومت مورد نظر حاصل می‌شود. درصورتی‌که باران ادامه داشته باشد بهتر است سطح نمای ساختمان با نانو مواد مقاوم در برابر رطوبت پوشانده شود تا از نفوذ رطوبت درون جسم مصالح و کرمو شدن آن جلوگیری شود. در خصوص خاصیت لرزه ای مصالح باید عنوان کرد که مصالح فوق به شرط باربری در ساختمان های بنایی کلافدار کاربرد دارند و در این مورد از ضوابط فصل ساختمان های بنایی با کلاف از مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان پیروی می‌کنند. با بررسی آزمایشگاهی خاصیت لرزه‌ای دیوار خاک فشرده، وارد شدن نیروهای لرزه‌ای و افزایش آن‌ها موجب افزایش تنش‌های پیش فشاری محوری می‌شود. با افزودن تثبیت‌کننده‌ها مانند سیمان به میزان ۵ درصد مقاومت نهایی پنل‌های دیوار تا ۲۶٫۶٪ نسبت به نمونه بدون سیمان ارتقاء یافته است (Ramezanpour et al.,2021. 12).

با افزودن درصد خاک رس به‌عنوان مصالح انعطاف‌پذیر و دارا بودن خاصیت کششی تا حدودی، مقاومت لرزه ای و با افزایش درصد ماسه مقاومت فشاری مصالح افزایش می‌یابد. از طرفی شیوه‌ی طراحی بلوک (لحاظ کردن عایق حرارتی، آکوستیکی و...)، طراحی نوع اتصالات و شیوه‌ی گیرداری مصالح به یک‌دیگر بر عملکرد دوام، عملکرد محیطی و خواص مصالح تاثیرگذار است.

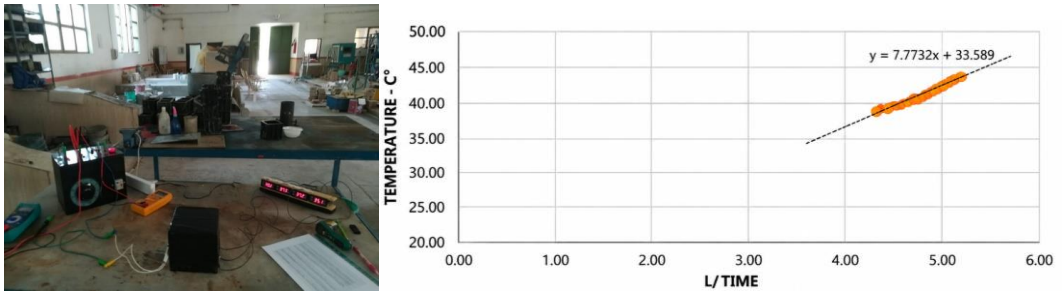
٤-٨- عملکرد حرارتی مصالح

جرم حرارتی به‌عنوان یکی از پایه‌ای ترین بخش های رفتار حرارتی دیوار خاک کوبیده محسوب می‌شود (B. Lovec et al., 2015, 5) در جدول ۱۱ فاکتورهای حرارتی دیوار خاک کوبیده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر قابل مشاهده است. در جدول ۱۱ مقادیر ضریب هدایت حرارت و مقاومت حرارتی بر حسب میزان تراکم مصالح و دیوار در بازه ۱۷۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ارائه شده و صرفا وابسته به ضخامت نیست. با افزایش تراکم مصالح ضریب هدایت حرارت آن افزایش می‌یابد. در نتیجه مقاومت حرارتی جدار کاهش می‌یابد. مبنای ارائه‌ی این اعداد پژوهش‌های قبلی است. در ادامه فاکتورهای حرارتی مصالح ساخته شده به صورت میدانی اندازه‌گیری شده و با پژوهش‌های پیشین اعتبارسنجی شده است.

جدول ۱۱- فاکتورهای حرارتی خاک فشرده (B. Lovec et al., 2015)

تراکم (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضریب هدایت حرارت (وات بر متر کلوین)	ضریب انتقال حرارت (وات بر مترمربع کلوین)	مقاومت حرارتی (مترمربع کلوین بر وات)
۱۷۰۰ – ۲۲۰۰	۰,۷ – ۱,۲۵	۲,۳۳ – ۴,۱۷	۰,۴۱ – ۰,۶

آزمون اندازه‌گیری، تحلیل دماها و محاسبه‌ی ضریب هدایت حرارت مصالح با استفاده از استاندارد ASTM D5334 و با روش کاوشگر سوزنی انجام شده است. این تکنیک که به‌عنوان یک روش ساده و سریع شناسایی شده است، شامل اندازه‌گیری افزایش دما در یک مسیر تعریف شده از یک منبع خطی گرما (سیم داغ) است که در ماده تست نمونه فرو برده می‌شود. این روش جهت مواد با هدایت حرارت پایین و خاک‌ها موفق عمل کرده است (J.E et al., 2013, 3375). تصاویر زیر اتصالات و ابزار مورد نیاز، همچنین؛ فرآیند انجام آزمایش را نشان می‌دهد. در ادامه جدول ۱۲ نیز فاکتورهای حرارتی اندازه گیری شده مصالح را بیان می کند.



مجموعه تصاویر ۸ – اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارت مصالح. نمودار دما بر حسب لگاریتم زمان(سمت راست)؛ فرآیند انجام آزمون (سمت چپ)

جدول ۱۲- فاکتورهای حرارتی اندازه‌گیری شده مصالح خاک فشرده

متوسط گرمای تزریق شده (وات)	ضخامت مصالح/ دیوار (سانتی متر)	ضریب هدایت حرارت (وات بر متر کلوین)	مقاومت حرارتی (متر مربع کلوین بر وات)
۱۳,۳۵	۳۰	۰,۶۱	۰,۴۹

میزان گرمای تزریق شده جهت محاسبه‌ی ضریب هدایت حرارت مصالح، ۱۳,۳۵ وات و ضخامت بلوک مصالح ۳۰ سانتی‌متر است. در فرآیند انجام آزمایش، داده‌های دمایی سطوح بیرونی و داخلی مصالح گردآوری و تحلیل شده، نمودارهای دما بر حسب لگاریتم زمان ترسیم و ضریب هدایت حرارت مصالح محاسبه شده است. در ادامه مقاومت حرارتی جدار با جمع مقاومت لایه‌های جدار به‌دست آمده است. مقاومت حرارتی به‌دست آمده با دیگر نتایج و پژوهش‌های کار شده اعتبارسنجی شده و صحت آن به اثبات رسیده است. جدول ۱۳ در مورد نتایج دیگر پژوهش‌ها در دانشگاه‌های کاسل، بلگراد و لوند گزارش می‌دهد. در دانشگاه‌های کاسل و بلگراد مقاومت حرارتی جدار خاک فشرده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر حدود ۰,۵ متر مربع کلوین بر وات گزارش شده که مقاومت حرارتی در نتیجه آزمایش ها ۰,۴۹ مترمربع کلوین بر وات به‌دست آمده است. بنابراین در محدوده‌ی پژوهش‌های قبل است. در دانشگاه لوند برای مقاومت حرارتی یک بازه تعیین شده که عدد مقاومت به‌دست آمده در بازه‌ی ذیل قرار دارد.

جدول ۱۳- اعتبارسنجی نتایج مقاومت حرارتی مصالح خاک فشرده با پژوهش‌های پیشین

دانشگاه	ضخامت (سانتی‌متر)	مقاومت حرارتی (مترمربع کلوین بر وات)
کاسل	۳۰	۰,۵~
بلگراد	۳۰	۰,۵~
لوند	۳۰	۰,۳۵ –۰,۷

با توجه به اینکه عدد مقاومت حرارتی به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح (دیوار) خاک فشرده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برابر با ۰,۴۹ مترمربع کلوین بر وات است و این عدد مقاومت حرارتی لازم را ایفا نمی‌کند، لازم است طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان برای دیوار عایق حرارتی در نظر گرفت. عایق حرارتی مورد استفاده در محل میانی دیوار پیشنهاد می‌شود. به‌طوری‌که دیوار دوجداره در نظر گرفته می‌شود. ضخامت لایه‌های دیوار ۲۰ سانتی‌متر ار سمت خارج و ۱۰ سانتی‌متر از سمت داخل است و عایق حرارتی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در میان لایه‌های آن تعبیه می‌شود. با این راهکار مقاومت حرارتی دیوار از ۰,۴۹ به ۲,۳۱ مترمربع کلوین بر وات افزایش یافته، انتقال حرارت از خارج به داخل ساختمان به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود. مقاومت حرارتی جدار از جمع مقاومت حرارتی لایه‌های دیوار به ترتیب مقاومت لایه‌ی خارجی، عایق میانی، لایه‌ی داخلی و مقاومت هوای داخل و خارج به‌دست آمده است.

۵- یافته‌ها و بحث

با توجه به پژوهش های پیشین، فرآیند ساخت مصالح با فناوری خاک فشرده و آزمایش‌های انجام شده بر روی این مصالح خاک رسی ریزدانه با دانه‌بندی مناسب خاک رس، ماسه شسته و مقدار کمی شن برای تولید مصالح مورد نیاز است. با توجه به مطالعات انجام شده درصد اختلاط مناسب مصالح برای ساخت بلوک خاک فشرده به‌صورت ۱۰ تا ۳۰ درصد شن، ۴۰ تا ۶۰ درصد ماسه، ۳۰ تا ۵۰ درصد رس و لای، ۳ تا ۵ درصد سیمان و ۸ تا ۱۲ درصد رطوبت است. در نمونه‌های ساخته شده درصد اختلاط مناسب مصالح برای ساخت بلوک خاک فشرده حدود ۴۰ درصد رس و لای، ۴۰ تا ۵۰ درصد ماسه، ۳ تا ۵ درصد سیمان و حدود ۸ تا ۱۰ درصد آب جهت مرطوب کردن ملات مصالح و کوبیدن راحت‌تر آن مورد نیاز است. بسته به جنس خاک مورد استفاده اعداد فوق تغییرات کمی را تجربه می‌کنند. درصد خاک رس و ماسه بسته به جنس خاک و اقلیم ممکن است تا ۱۰ درصد تغییرات و جابه‌جایی داشته باشد. میزان رطوبت در اکثر مواقع تا ۱۰ درصد کفایت می‌کند و در مواقعی می‌تواند تا ۱۲ درصد افزایش داشته باشد، چراکه بیشتر از آن عملیات کوبش را با مشکل مواجه می‌سازد. مقامت فشاری لازم در نمونه‌های بررسی‌شده پیشین از یک تا دو مگاپاسکال متغیر است. طبق مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان، مقاومت فشاری حداقل و مجاز به ترتیب جهت استفاده در دیوارهای باربر برابر با ۲ و ۳,۵ مگاپاسکال است که طبق آزمایش‌های انجام شده مصالح فوق از مقاومت های ۳,۷۲، ۳,۸۵ و ۲,۷۳ مگاپاسکال برخوردار هستند. اگر در مواقعی مقاومت فشاری کمی کمتر از حد مجاز باشد به‌منظور ایجاد چسبندگی بیشتر میان اجزای مصالح، می‌توان از سیمان یا دیگر مصالح چسباننده با درصد بیشتری تا حد ۱۲ درصد در طرح اختلاط مصالح استفاده کرد.

تست‌های فاکتورهای حرارتی بر روی مصالح مطابق با استانداردها انجام و با نتایج پیشین اعتبارسنجی شده است. عدد مقاومت حرارتی به‌دست آمده از آزمایشات انجام شده بر روی مصالح (دیوار) خاک فشرده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برابر با ۰,۴۹ متر مربع کلوین بر وات به‌دست آمده است. این در حالی است که نتایج پیشین مقاومت حرارتی جدار خاک کوبیده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر را حدود ۰,۵ متر مربع کلوین بر وات ارائه می‌دهند. ازآنجایی‌که این عدد مقاومت حرارتی لازم را ایفا نمی‌کند، لازم است طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان برای دیوار متشکل از مصالح، عایق حرارتی در نظر گرفت. عایق حرارتی مورد استفاده در محل میانی دیوار پیشنهاد می‌شود. به‌طوری‌که دیوار به‌صورت دوجداره در نظر گرفته شده (۲۰ سانتی‌متر ار سمت خارج و ۱۰ سانتی‌متر از سمت داخل) و عایق حرارتی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در میان آن‌ها تعبیه می‌شود. با این راهکار مقاومت حرارتی دیوار از ۰,۴۹ به ۲,۳۱ مترمربع کلوین بر وات افزایش یافته، انتقال حرارت از خارج به داخل ساختمان به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در مصرف انرژی نیز صرفه‌جویی می‌شود. مصالح فوق به‌دلیل عدم آتش‌پذیری خاک در برابر حریق مقاوم است و طبق آزمایش انجام شده، هر ساعت که از آتش‌سوزی بگذرد، حدود دو سانتی‌متر از ضخامت مصالح جدار تحت تاثیر حریق قرار می‌گیرد. در خصوص عملکرد محیطی و خواص مصالح نیز باید بیان کرد که تنها عامل موثر بر روی بلوک خاک

فشرده نفوذ آب درون جسم مصالح است که با آب‌گریز کردن نمای ساختمان می توان آن را از نفوذ آب و در معرض قرار گرفتن رطوبت زیاد ایمن کرد. البته بهتر است ازاره ساختمان با سنگ یا مصالح مقاوم در برابر رطوبت کار شود تا از نفوذ رطوبت صعودی به مصالح جلوگیری کند. در ادامه باید بیان کرد که چینه‌های محصور کننده باغات تاریخی نوعی از روش‌های متراکم‌سازی خاک بوده که سالیان طولانی در برابر عوامل جوی و فرسایش دوام آورده و تا کنون پایداری خود را حفظ کرده‌اند. با توجه به موارد مطرح شده و نتایج آزمایش‌های انجام شده، می‌توان امکان بکارگیری مصالح با استفاده از فناوری خاک فشرده در ساختمان را تصدیق کرد.

۶- نتیجه‌گیری

بکارگیری اجزای ساختمانی با فناوری خاک فشرده در مطالعات و پژوهش های پیشین تایید شده و نمونه های اجرایی آن چه در کشور ایران و چه خارج از ایران قابل مشاهده است، اما پیاده‌سازی فناوری خاک فشرده در قالب مصالح ساختمانی نیازمند انجام مطالعات میدانی است. امکان‌سنجی بکارگیری مصالح ساختمانی سبز با فناوری خاک فشرده، با سنجش جمعی از فاکتورهای مکانیکی، حرارتی، مقاومت در برابر حریق و رطوبت به همراه نتیجه‌گیری از این فرآیند حاصل می‌شود. سنجش فاکتورهای مکانیکی به‌منظور تعیین نسبت تک تک مواد و مصالح به‌کار رفته در طرح اختلاط و تامین مقاومت فشاری لازم برای بلوک خاک فشرده انجام شده و اندازه‌گیری فاکتورهای حرارتی به‌منظور امکان تامین بخشی از انرژی سرمایش و گرمایش فضا به شیوه غیرفعال صورت گرفته است. در ادامه بررسی حریق و جذب رطوبت مصالح به‌منظور اخذ فاکتورهای فنی و مهندسی مورد نیاز و امکان کاربرد مصالح خاک فشرده به صورت تخصصی در مقیاس واقعی است. جهت ساخت بلوک های خاک فشرده، استفاده از خاک رس ریزدانه، ماسه شسته به‌عنوان پر کننده، چسباننده جهت تامین بخشی از خواص مکانیکی مصالح مانند مقاومت فشاری، آب به‌عنوان مرطوب کننده و تسهیل کننده کوبش خاک به ترتیب با درصدهای ۴۰، ۴۵ تا ۵۰، ۳ تا ۵ و ۸ تا ۱۰ درصد مورد نیاز است. مدنظر قرار دادن درصدهای فوق در طرح اختلاط مصالح، مقاومت فشاری حداقل ۲ مگاپاسکال را برای بلوک خاک فشرده فراهم می‌آورد. در خصوص کسب فاکتورهای حرارتی حداقل، لازم است ضریب هدایت حرارت مصالح کاهش داده شود و با استفاده از افزودنی‌ها و ورود مواد و مصالح دیگر که ترجیحا بومی باشند، مقاومت حرارتی جدار افزایش داده شود. یافته‌های پژوهش در بخش‌های مختلف صنعت ساختمان از قبیل ساختمان‌های مسکونی، اداری، آموزشی، درمانی و ساخت اقامتگاه‌های موقت و دائمی در زمان حوادث پیش‌بینی نشده مانند زلزله و جنگ کاربرد دارد. افزایش مقاومت حرارتی جدار موضوع پژوهش‌های آتی مصالح ساختمانی با فناوری خاک فشرده است. محدودیت‌های استفاده از ابزار ساخت و اندازه‌گیری در آزمایشگاه‌ها و دسترسی محدود به آزمایشگاه‌های مورد نیاز هم فرآیند انجام کار را پیچیده و دست‌خوش زمان کرده و هم سبب شده تا افراد کمتری وارد حوزه‌ی پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی شوند و در ایجاد و توسعه‌ی فناوری‌های صنعت ساختمان نقشی ایفا کنند.

پی‌نوشت

1- CRAterre Earth Architecture Institute
2- DIN 4102
3- DIN 18952
4- Olivier and Mesbah
5- Suction
6-BRL
7-CEB

حامیان مالی: این پژوهش به طور مستقیم حامی مالی نداشته است، اما آزمایشگاه مصالح دانشگاه یزد، مصالح مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌ها را در اختیار پژوهشگر قرار داده است.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسنده اعلام می‌دارد که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسنده اعلام می‌کند که از ابزار هوش مصنوعی ChatGPT برای ترجمه بخش چکیده انگلیسی استفاده شده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله بر عهده نویسنده است.

قدردانی: از دکتر نریمان فرحزا عضو هیئت علمی دانشکده معماری دانشگاه یزد جهت مکاتبه با آزمایشگاه مصالح و در اختیار قرار دادن آن و دکتر حمید رضائیان یزدی جهت مشاوره علمی در بخش اندازه گیری ضریب هدایت حرارت مصالح خاک فشرده برای انجام پژوهش سپاس‌گزارم.

منابع

خواجویان، سارا. (۱۴۰۰). بررسی آسایش حرارتی مسکن خاک فشرده در اقلیم گرم و خشک منطقه ی یزد، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشگاه هنر ایران، دانشکده معماری و شهرسازی، گروه فنون معماری و مدیریت پروژه.*

درمحمدی، منصوره و رحیم‌نیا، رضا. (۱۳۹۶). تثبیت مکانیکی خاک و تبیین جایگاه آن در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک. *معماری اقلیم گرم و خشک*، ۵(۶)، ۴۹-۲۹.

دوتیه، ژان. (۱۳۸۵). *آینده سنتی، هزاران ساله یا معماری با خاک*. ترجمه محمد احمدی نژاد. اصفهان: خاک.

فرح زا، نریمان، مهاجرانی، محبوبه (۱۳۹۹). روش های پیشرفته معماری با خاک. گنجینه یزد – *فصلنامه سازمان نظام مهندسی ساختمان استان یزد*، ۱۹ (۵۳)، ۹۴- ۱۰۵.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۹۸). *مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان (ویرایش سوم)*. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۸۹). *مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش سوم)*. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

مینکه، گرنوت. (۱۳۹۵). *معماری خاک – طراحی و تکنولوژی ساخت ابنیه بر اساس معماری پایدار*. ترجمه شهرزاد رمضانی. تهران: پارت

وارن، جان. (۱۳۸۷). *حفاظت سازه‌های گلین*. بازبینی و اصلاح: باقر آیت‌الله زاده شیرازی. ترجمه مهرداد وحدتی. تهران: رسانه پرداز با همکاری موسسه فرهنگی ایکوموس ایران.

Anysz, H. & Narloch, P. (2019). Designing the Composition of Cement Stabilized Rammed Earth Using Artificial Neural Networks. *Materials*,12,1396, 1-27. https://doi.org/10.3390/ma12091396

B.Lovec, V., D.Jovanovic- P, M. & D.Zivkovi, B. (2015). The thermal behavior of rammed earth wall in traditional house in vojvodina: Thermal mass as a key element for thermal comfort.

Ciancio, D., Jaquin, P. & Walker, P. (2013). Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. *Construction and Building Materials,* 42, 40–47. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049

Dong, X., Soebarto, V. & Griffith, M. (2014). Achieving thermal comfort in naturally Ventilated rammed earth houses. *Journal of building and environment*, 82, 588-598. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.029

Deepak, J., Abhijit, M., Hannah, P. & Joshua, B. (2019). Enhanced thermal resistance of rammed earth blocks with recycled industry by-products. *International Journal of Thermal Sciences,* 138, 447–458. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.01.017

Giada, G., Caponetto, R. & Nocera, F. (2019). Hydrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability*, 11, 5342, 1-21. https://doi.org/10.3390/su11195342

Hall, M. & Djerbib, Y. (2006). Moisture ingress in rammed earth: Sorptivity, surface receptiveness and surface inflow velocity. *Journal of Construction and Building Material*, 20, 384 – 395. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.004

J.E, L., F.A, L., W, P (2013). Measuring soil thermal properties for use in energy foundation design. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,* 3375-3378.Paris.

Jiang, B., Wu, T., Xia, W & Liang, J. (2020). Hydrothermal performance of rammed earth wall in Tibetan Autonomous prefecture in Sichuan province of china. *Journal of Building and environment*, 181, 107-128. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107128

Khadjavian, S., Mahdavinia, M., Farahza N. & Rezaeian Yazdi, H. (2024). Thermal comfort evaluation of a Rammed Earth residential building: case study: Yazd city in Iran. *Journal of Advances in Building Energy Research*, 18, 1-23. https://doi.org/10.1080/17512549.2024.2417300

Norton, J. (1997). Building with earth: A handbook (2nd edition). *Intermediate Technology Publications*, London, UK.

Q.B. B, J.C. M, B.V. V, W. G. (2009). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment* 44, 912–919. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.001

Quoc-B, Jean-Claude M, Stéphane H, Peter W. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, *Construction and Building Materials* 54, 163–169. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067

Ramezanpour, M, Eslami, A and Ronagh, H. (2021). Seismic performance of stabilized/ unsterilized rammed earth walls. *Engineering Structures* 245, 112982, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112982

Serrano, S., Barreneche, C, Rincon, L, Boer, D & F.Cabeza, L.(2012). Stabilized rammed earth incorporating PCM: Optimization and improvement of thermal properties and Life Cycle Assessment. *Energy Procedia* 30, 461 – 470. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.010

Siddiqua, S and Barreto, P N.M. (2018). Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash. *Construction and Building Materials* 169, 364–371. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.209

Soudani, L., Woloszyn, M., Fabbri, A., Morel, J & Grillet, A. (2017). Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. *Journal of solar energy*, 141, 70 – 80. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.002

Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure (D5334-14). This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Tinsley, J & Pavia, S. (2019). Thermal performance and fitness of glacial till for Rammed Earth construction. *Journal of Building Engineering*.1.15. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.010

Toufigh, V & Kianfar, E. (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidity levels and their environmental impact. *Journal of Construction and Building Materials,* 200,616-629. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050