Journal of Research on Archaeometry, 2021; 7 (2): 37-56

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.7.2.37 URL: https://jra-tabriziau.ir/

Original Paper

A New Method for Measuring Permeability and the Insulation Property of Earthen Materials Against Moisture and Rainfall in Archaeological Sites and Monuments

Masoud Bater [*1], Hossein Ahmadi [2], Jahangir Abedi Koupai [3]

[1]. Assistant Professor, Department of Conservation and Restoration of Historical Artifacts, Faculty of Art and Architecture, University of Zabol, Zabol, IRAN

[2] .Associate Professor, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Isfahan, IRAN

[3]. Professor, Faculty of Agriculture Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, IRAN

Received: 24/10/2021 **Accepted: 24/12/2021**

Abstract

Today, accurate and scientific study of archaeological findings and historical and cultural property in many studies, especially in archeometry and restoration, relies on the use of experimental methods. The ability to replicate and generalize the results of applying practical methods using laboratory methods on the statistical population makes researchers more confident in analyzing the results of objective experiments to achieve reality. However, access to scientific and standard laboratory methods is one of the essential requirements of experimental techniqes that can be employed to accurately measure and evaluate the various physical, chemical, and mechanical properties of historical and cultural samples. The purpose of this study is to find a standard test that can use to measure the permeability and insulation properties of materials used in historical buildings against moisture. To achieve this goal, for the first time, falling head method was used to measure the permeability and insulation of traditional and ancient Kahgel plaster against moisture in historical buildings and architectural heritage. The samples of Kahgel plaster improved with different additives were compared to the typical Kahgel plaster samples as a control sample. Results of the study showed that using the laboratory method, reconstructed the conditions and behavior of water during adsorption and penetration into historical samples materials and represent their actual performance against moisture and rainfall. Therefore, it is possible to measure their permeability and insulating properties of earthen materials against water quantitatively in saturated conditions with this method.

Keywords: Laboratory Study, Historical Materials, Permeability, Insulation Against Moisture, Kahgel Plaster, Mud Adobe

*Corresponding Author: masoud.bater@uoz.ac.ir

Introduction

Careful study of archaeological findings and historical and cultural artifacts in many studies and researches, especially in archeology and restoration, is based on the use of experimental methods. The ability to repeat and generalize the results of experimental studies through access to qualitative and quantitative data obtained from laboratory methods on the statistical population makes it more reliable through the analysis of results to a near-realistic conclusion was reached about historical and cultural monuments. Therefore, one of the critical concerns of researchers in the field of archaeological findings, historical and cultural property, and architectural heritage is the access to the accurate and standard testing methods.

Fortunately, today in many academic sciences and disciplines, a wide variety of standardized tests for measuring data and variables by the relevant standard institutes are designed. Usually, these laboratory methods and standardized tests are regularly updated and developed every year. Still, in new sciences and interdisciplinary sciences, such as archaeometry and restoration, access to scientific and standard methods for measuring and evaluating the desired characteristics has always been one of the crucial problems .

Therefore, it seems that the effort to design, standardize and also evaluate the experimental methods available in various sciences and to use these methods in the laboratory study of historical and cultural works, should be paid more attentions.

The strength, and durability of materials in traditional and historic buildings, especially insulating coatings against moisture and rainfall, as well as new materials that are used in the protection, restoration, and reconstruction of architectural heritage are very important. Therefore, in many experimental studies and researches that are carried out on these historical and cultural monuments, evaluation and measurement of permeability and insulation properties of building materials due to rainfall and humidity and their changes over time is very important.

The purpose of this study is to find a standard laboratory method to measure the permeability and insulation properties against moisture and rainfall, in historical and cultural buildings and architectural heritage .

Materials and Methods

This applied research has been carried out using experimental-analytical methods. Various techniques have been used to collect data, including: library, laboratory and field studies. Because the insulating property of building materials, such as Kahgel plaster against moisture in historical buildings, is directly related to the amount of moisture penetration into the material, therefore, it seems that quantifying the insulating property in historical and traditional materials, can be achieved by determining the permeability of these materials by standard laboratory methods. Therefore, to achieve this purpose, the standard test for determining the Coefficient of Permeability (i.e. Falling Head Hydraulic Conductivity Method) was used to measure the permeability and insulation property of Kahgel plaster against moisture and rainfall .

To measure the degree of insulation of traditional materials in historical buildings against moisture and rainfall, after preparing a series of laboratory samples of Kahgel plaster, their permeability coefficients were determined. To do this, after selecting the appropriate soil (Figure 3) and achieving the optimal ratio of soil and straw fibers for providing kahgel plaster through laboratory study (Figure 4), the effect of adding several samples of ad, the permeability coefficient of kahgel plaster samples with falling head method were measured. Various additives were used to improve the insulation property of kahgel plaster, including micro silica, feldspar, kaolin, and micronized bentonite with different granulations of 150 and 45 microns in two concentrations of 3 and 6 wt% (Table 3).

Results

The permeability coefficient of normal kahgel plaster samples (control kahgel plaster) were measured. Then, the permeability coefficient of new kahgel samples containing mineral additives were determined. Finally, the results of determining the permeability coefficient of normal kahgel samples

(control samples) were compared with new kahgel samples improved with additives (Tables 4 and 5 and Figures 11 and 12).

Discussion

The results of determining the permeability coefficient of kahgel plaster samples prepared with different mineral additives in comparison with normal kahgel, showed that the additives including micro silica, feldspar, kaolin, and bentonite have a positive effect on reducing the permeability coefficient of straw against water penetration. So that, most of the additives used have reduced the permeability coefficient of kahgel plaster. Among them, the use of kaolin, feldspar, and micro-silica had the most significant effect on improving the insulation properties, respectively, and bentonite is in the last ranking (Tables 4 and 5 and Figures 11 and 12) .

Thus, it is observed that laboratory studies on kahgel plaster with the new laboratory method introduced in this study indicated the important functional characteristics of kahgel plaster, that is, its insulating property against moisture and rainfall, and as a result the durability of this traditional and ancient kahgel against environmental erosion. Thus, this method could be efficiently used to quantitative measure this vital property of earthen materials.

Conclusion

The laboratory study of kahgel plaster and the measurement of permeability and insulation against moisture, well indicated the desirable capability of this standard laboratory method in the experimental study of this coating. The results of this study showed that by using this laboratory method, it is possible to investigate the effect of additives in improving or decreasing the permeability and insulation of kahgel plaster against moisture and rainfall. Therefore, the proposed laboratory method has an excellent ability to quantitatively measure the permeability and insulation properties of materials used in historical buildings and ancient sites, which helps to easily examine and evaluate all traditional materials and building materials used in historical buildings and ancient sites with this method.

It should be noted that the use of this laboratory method to determine the penetration and insulation properties of building materials, especially earth materials used in historical buildings and architectural heritage is unprecedented and from this perspective is a new and innovative method. In fact, for the first time, a small step was taken in the development and standardization of experimental experiments and the introduction of new laboratory methods introduced in the study of materials used in historical and cultural buildings and architectural heritage.

This experimental method can be used to quantitative measure the insulation property and erosion over time, and accordingly, by evaluating this critical variable, helped to improve and strengthen the traditional materials used in the conservation and restoration of historical and cultural buildings and valuable architectural heritage.

Acknowledgments

The support of the Vice Chancellor for Research and Technology of Zabol University under the grant with research code IR-UOZ-GR-7987 is thanked and appreciated.

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۰؛ ۷(۲): ۳۷-۵۶

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.7.2.37

URL: http://jra-tabriziau.ir/

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله پژوهشی

روش جدیدی برای اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق بندی مصالح خاکی در مقابل رطوبت و بارندگی در محوطه‌های باستانی و بناهای تاریخی

مسعود باتر *[۱]، حسین احمدی[۲]، جهانگیر عابدی کوپایی [۳]

۱. استادیار گروه حفاظت و مرمت آثار تاریخی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

۲. دانشیار گروه مرمت آثار تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

۳. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۰/۱۰/۰۳

چکیده

امروزه بررسی دقیق و علمی یافته‌های باستانشناختی و اموال تاریخی و فرهنگی در بسیاری از پژوهش‌ها، به‌ویژه در رشته‌های باستانسنجی و مرمت، متکی به کاربرد روش‌های تجربی است. قابلیت تکرار و تعمیم نتایج حاصل از به‌کارگیری روش‌های تجربی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بر روی جامعه آماری مورد نظر، موجب می‌گردد که پژوهشگران با اطمینان بیشتری از طریق تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های عینی به واقعیت دست یابند. با این وجود، یکی از مهمترین الزامات استفاده از روش‌های تجربی، دسترسی به روش‌های آزمایشگاهی علمی و استانداردی است که بتوان به‌کمک آنها به‌طور دقیق، ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نمونه‌های تاریخی و فرهنگی را مورد سنجش و ارزیابی قرار داد. هدف از انجام این پژوهش، یافتن آزمون استانداردی است که بتوان به‌کمک آن، میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق‌بندی مواد و مصالح به‌کار رفته در بناهای تاریخی را در مقابل رطوبت اندازه‌گیری نمود. در این پژوهش، برای دستیابی به این هدف، برای اولین بار برای اندازه‌گیری خاصیت نفوذپذیری و عایق‌بندی اندود کاهگل در مقابل رطوبت در بناهای تاریخی و میراث معماری، از آزمون تعیین ضریب نفوذپذیری آب با بار افتان، استفاده شد. به‌منظور سنجش و ارزیابی کارایی این روش آزمایشگاهی برای بررسی عایق‌بندی و میزان نفوذپذیری مصالح تاریخی، این ویژگی مهم در نمونه‌هایی از اندود کاهگل بهسازی شده با مواد افزودنی مختلف در مقایسه با نمونه‌هایی از اندود کاهگل معمولی به عنوان نمونه شاهد مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از این روش آزمایشگاهی، شرایط و رفتار آب در هنگام جذب و نفوذ به نمونه‌های تاریخی مصالح تا حد زیادی بازسازی شده و نحوه عملکرد واقعی آنها در مواجه با رطوبت و بارندگی بازنمایی می‌شود، بنابراین، می‌توان میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق‌بندی آنها را در مقابل آب به‌صورت کمی در شرایط اشباع با این روش، اندازه‌گیری نمود.

واژگان کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، مواد و مصالح تاریخی، نفوذپذیری، عایق‌بندی در مقابل رطوبت، کاهگل، خشت و گل.

* نویسنده مسئول مکاتبات: زابل، دانشگاه زابل، دانشکده هنر و معماری، گروه حفاظت و مرمت آثار تاریخی، کد پستی: ۹۸۶۱۳۳۵۸۵۶

پست الکترونیکی: masoud.bater@uoz.ac.ir

۱. مقدمه

بررسی و مطالعهٔ دقیق یافته‌های باستان‌شناختی و آثار تاریخی و فرهنگی در بسیاری از مطالعات و پژوهش‌ها، به ویژه در باستان‌سنجی و مرمت، مبتنی بر استفاده از روش‌های تجربی است. قابلیت تکرار و تعمیم نتایج حاصل از مطالعات تجربی از طریق دسترسی به داده-های کیفی و کمّی حاصل از روش‌های آزمایشگاهی بر روی جامعه آماری مورد نظر، موجب می‌شود که با اطمینان بیشتری از طریق تجزیه و تحلیل نتایج به یک جمع‌بندی نزدیک به واقعیت در مورد آثار تاریخی و فرهنگی، دست یافت. با این وجود، یکی از مهمترین الزامات استفاده از روش‌های تجربی در بررسی و مطالعه آثار تاریخی و فرهنگی، به منظور بررسی و مطالعه ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آن‌ها، دسترسی به روش‌های آزمایشگاهی علمی و استانداردی است که بتوان به‌کمک آن‌ها به-طور دقیق، این ویژگی‌ها، را در آثار مورد نظر، مورد سنجش و ارزیابی قرار داد تا در ادامه، پژوهشگران قادر باشند که از طریق بررسی و تحلیل داده‌ها و نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی به پرسش‌های خود در حوزهٔ میراث فرهنگی و آثار تاریخی، پاسخ دهند. بنابراین، همواره یکی از دغدغه‌های مهم محققان و پژوهشگران در تمامی سطوح و علوم تخصصی و دانشگاهی، به‌ویژه کسانی که به مطالعه و پژوهش‌های تجربی در حوزه یافته‌های باستان‌شناختی، اموال تاریخی و فرهنگی و میراث معماری دست می‌زنند، دسترسی به روش‌های علمی دقیق و استانداردی است که با اطمینان، دقت و صحت مناسب، داده‌های مورد نیاز در آن پژوهش را بتوان با کمک آن‌ها به‌درستی و سهولت اندازه‌گیری کرد و مورد سنجش قرار داد. سهولت کاربرد، دسترسی آسان، صحت نتایج، دقت مناسب، قابلیت تکرار، صرفهٔ اقتصادی و قابلیت تعمیم نتایج، از مهمترین ویژگی‌هایی است که روش‌های آزمایشگاهی استاندارد مورد استفاده در پژوهش‌های تجربی در تمامی علوم و دانش‌ها، باید از آن برخوردار باشند.

خوشبختانه امروزه در بسیاری از علوم و رشته‌های تخصصی دانشگاهی، به ویژه در دانش‌ها و رشته‌های تخصصی که زیر مجموعهٔ علوم تجربی، پزشکی، دامپزشکی، علوم پایه، کشاورزی، منابع طبیعی و فنی و مهندسی هستند، آزمون‌های استاندارد متنوع و گسترده‌ای برای اندازه‌گیری داده‌ها، متغیّرهای پژوهش و ویژگی‌های مورد مطالعه و تحقیق به‌وسیلهٔ مؤسسات استاندارد مربوطه، طراحی، معرفی و پیشنهاد شده‌اند و برای انجام آن‌ها نیز، دستورالعمل‌های دقیقی تهیه شده است که معمولاً، هر ساله این روش‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های استاندارد به‌طور منظم روز آمد می‌شوند و توسعه می‌یابند و دستورالعمل‌های انجام آن‌ها نیز به طور مرتب، چاپ و منتشر می‌شوند و در اختیار متخصصان و صاحب‌نظران این رشته‌ها قرار می‌گیرند. از جمله مهمترین مؤسسات استانداردی که در این راستا، گام‌های بسیار مهمی برداشته‌اند، می‌توان به انجمن بین‌المللی مواد و آزمون آمریکا[1]، انجمن بین-المللی ادارات حمل و نقل و بزرگراه‌های ایالتی امریکا[2]، مؤسسه بین‌المللی استاندارد انگلیس[3] و مؤسسه ملی استاندارد آلمان[4] اشاره کرد، در ایران نیز سازمان ملی استاندارد ایران، در این زمینه فعالیت‌های خوبی داشته است.

با وجود تهیه و تدوین چنین دستورالعمل‌هایی برای انجام بررسی‌های آزمایشگاهی در پژوهش‌های تجربی در سطح ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی جهت رفع نیازهای پژوهشگران رشته‌های مختلف علوم در سراسر جهان، دانشمندان، پژوهشگران، متخصصان علوم مختلف و تمامی مراکز پژوهشی همواره، هنوز هم به ابداع روش‌های جدیدتر و توسعهٔ آن‌ها نیاز است، به-طوری که این روش‌های جدید آزمایشگاهی بتوانند، پاسخگوی نیازهای جدید آن‌ها در پژوهش‌های جاری و آتی باشند. بسیاری از این روش‌های جدید آزمایشگاهی، توسط همین افراد و مؤسسات به‌تدریج، ابداع، معرفی و توسعه و استانداردسازی شده‌اند. در مقایسه با علوم و دانش‌های فوق و نیاز روزافزون آن‌ها به روش‌های استاندارد جدید برای مطالعه و آزمایش،

در علوم جدید و دانش‌های میان رشته‌ای، همچون: باستان‌سنجی و مرمت که بیشتر آن‌ها، به نسبت سایر علوم، تقریباً، جدید و جوان، محسوب می‌شوند، این نیاز مهم، یعنی؛ دسترسی به روش‌ها و آزمون‌های علمی و استاندارد برای سنجش، اندازه‌گیری و ارزیابی ویژگی-های مورد نظر در موضوع مورد پژوهش، به منظور دسترسی به داده‌های مورد نیاز، همیشه یکی از معضلات و مشکلات مهمی بوده است که ذهن و اندیشهٔ پژوهشگرانی را که در این حوزه‌های جدید مشغول فعالیت بوده‌اند، به خود معطوف کرده است.

نکتهٔ مهم دیگری که همواره باید به آن توجه ویژه‌ای مبذول داشت آن است که پژوهش در حوزهٔ دانش‌ها و علوم میان رشته‌ای، نسبت به سایر علوم به ویژه از نظر روش‌شناسی، بسیار مشکل‌تر است و محدودیت‌های بسیاری را از جهات مختلف به محقق و پژوهشگر، تحمیل می‌کند؛ چون پژوهش‌های علوم میان رشته‌ای بر روی فصل مشترک دو یا چند رشته و دانش مختلف متمرکز هستند و در مسیر بسیار باریک و حساسی گام می‌نهند که در بسیاری از موارد، ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و حساسیت‌های خاصی دارد، همین امر موجب می‌شود که در انجام این پژوهش‌ها، نتوان از تمامی روش‌های آزمایشگاهی تجربی مرسوم و رایج و آزمون‌های استاندارد بین‌المللی و ملی موجود در سایر علوم، برای سنجش و ارزیابی در تحقیق و پژوهش مورد نظر، استفاده کرد.

در بسیاری از موارد نیز برای بررسی و سنجش خصوصیات مورد نظر در موضوع مورد پژوهش، در علوم میان رشته‌ای، هیچ روش تجربی و آزمایشگاهی استانداردی در میان انبوه آزمون‌های موجود، نمی‌توان یافت و یا این که روش آزمایشگاهی ارائه شده و دستورالعمل پیشنهادی، چون عملاً برای رشته تخصصی، دانش و نمونه‌های دیگری طراحی شده است، برای پژوهش‌های تجربی در علوم میان رشته‌ای مناسب به نظر نمی‌رسد.

مشکلاتی از این دست، در هنگام مطالعه و پژوهش-های تجربی بر روی آثار و اموال تاریخی و فرهنگی، یافته‌های باستان‌شناختی و میراث معماری بارها، ممکن است جلوه‌گر شود؛ بنابراین به نظر می‌رسد که ضروری است تا راستای طراحی، استانداردسازی و همچنین ارزیابی روش‌های تجربی موجود در علوم مختلف به منظور استفاده از این روش‌ها در بررسی آزمایشگاهی آثار تاریخی و فرهنگی بر اساس ویژگی-ها، محدودیت‌ها و حساسیت‌های موجود در موضوعات پژوهشی این علوم میان رشته‌ای تلاش شود. این موضوع یکی از وظایف و دغدغه‌هایی است که متخصصان علوم میان رشته‌ای، چون حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی و باستان‌سنجی، باید بیش از پیش به آن اهتمام ورزند.

چون در بیشتر مصالح بنایی سنتی مورد استفاده در بناهای تاریخی، به ویژه اندودهای عایق رطوبتی و ملات‌ها، اعم از مصالح تاریخی و باستانی اصیلی که در ساخت و ساز بنا و تزئینات معماری آن مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین، نمونه‌های مصالح جدیدی که در عملیات حفاظت، مرمت و بازسازی میراث معماری، مورد استفاده قرار می‌گیرد، خاصیت عایق بندی و میزان مقاومت مصالح در مقابل رطوبت و بارندگی، از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین، در بسیاری از مطالعات و پژوهش‌های تجربی که بر روی این آثار تاریخی و فرهنگی انجام می‌شود، ارزیابی و اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق‌بندی و تغییرات آن در طول زمان، متناسب با متغیّرهای مورد بررسی در نمونه‌های مطالعاتی، در مقابل بارش و رطوبت، بسیار با اهمیت و اساسی به نظر می‌رسد و دست یافتن به شیوه‌ای استاندارد و در خور برای سنجش و ارزیابی این ویژگی مهم در مصالح سنتی به‌کار رفته در بناهای تاریخی و فرهنگی اهمیت بسیاری دارد.

از سوی دیگر همواره به این نکته مهم نیز باید توجه داشت که هر چند تفاوت‌های بسیاری به لحاظ مفهوم و محتوا، میان واژگانی همچون آب‌بندی، عایق‌بندی و نفوذپذیری به لحاظ تخصصی وجود دارد ولی در عین حال، ارتباط مستقیمی نیز بین این مفاهیم دیده می‌شود

که شناخت این اشتراک‌ها و افتراق‌ها و تمایز بین آن‌ها به منظور ورود به این مبحث، به صورت علمی و تخصصی لازم و ضروری است.

قرار دادن ماده و لایه‌ای برای جلوگیری از نفوذ عوامل ناخوشایند، همچون: رطوبت، صدا، حرارت و غیره به‌داخل ساختمان [1,2] را به‌عنوان عایق‌کاری یا پنام‌کاری[5] می‌شناسند که خود دارای انواع مختلفی، همچون: عایق حرارتی، عایق صوتی، عایق رطوبتی و غیره است. این در حالی است که آب‌بندی[6] را جلوگیری از نفوذ آب به داخل بنا، اعم از بام، بدنه و یا کف بنا می‌شناسند که در برخی از موارد، ممکن است، تحت فشار نیز باشد [3]. این دو مفهوم با نفوذ[7] و نفوذپذیری[8] مواد و مصالح در بناها، ارتباط مستقیم دارد. نفوذ آب به لحاظ علمی، عبارت است از، فرایند کلی ورود آب به داخل مواد و مصالح، توسط جریان رو به پایین، از تمام و یا قسمتی از سطح مصالح [4]؛ در حالی که نفوذپذیری به معنای فرایند عبور عمودی آب از سطح به درون مصالح و یا از لایه‌ای به لایه دیگر است [4]. بررسی واژگان تخصصی مورد اشاره در بالا و مفاهیم ارائه شده به‌وسیلهٔ آن‌ها در ارتباط با مواد و مصالح مورد استفاده در بناهای تاریخی و فرهنگی و میراث معماری، حاکی از آن است که فصل مشترک تمامی آن‌ها، نفوذ و نفوذپذیری رطوبت در مصالح است، به همین علت می‌توان خاصیت عایق‌بندی در مصالح ساختمانی را، عکس حالت نفوذپذیری دانست؛ بنابراین مناسب‌ترین متغیّر و عاملی که در این میان، می‌توان به منظور ارزیابی ویژگی‌های فوق، مورد سنجش قرار داد، یافتن روشی علمی و استاندارد به منظور اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری در مصالح مورد استفاده در بناهای تاریخی و میراث معماری است [5].

علاوه بر این، باید به این مهم توجه کرد که با وجود محاسن و مزایای بسیاری که خاک و مصالح خاکی، همچون خشت و گل در ساخت و ساز دارد، این مصالح، در مقابل رطوبت و فرسایش ناشی از بارندگی بسیار ضعیف و آسیب‌پذیر هستند، به طوری که این نقطه ضعف مهم، استفادهٔ گسترده از آن‌ها را در معماری و ساخت و ساز با محدودیت روبه‌رو می‌کند [6]. در واقع، می‌توان گفت که علت اصلی تخریب بناهای خشت و گلی، فرسایش ناشی از بارندگی است [7]. تأثیر مخرّب ناشی از نفوذ رطوبت به داخل ساختار مواد و مصالح به‌کار رفته در بناهای تاریخی و فرهنگی، به ویژه در بناهای خشت و گلی در هنگام بارندگی در بدنهٔ خارجی بسیاری از بناهای تاریخی و میراث معماری مشهود است که این امر، موجب فرسایش شدید ساختارهای معماری در این آثار و بروز صدمات جبران ناپذیری به آن‌ها می‌شود (تصاویر ۱ و ۲).

شکل ۱: فرسایش ارگ تاریخی خشت و گلی شهر بلقیس در اسفراین در اثر نفوذ رطوبت ناشی از بارندگی

Fig. 1: Erosion of the historic clay and mud Belqis Esfarayen citadel due to penetration of moisture due to rainfall.

شکل ۲: فرسایش ساختار خشت و گلی کوه خواجه زابل در اثر نفوذ رطوبت ناشی از بارندگی توأم با طوفان شن و وزش باد

Fig. 2: Erosion of the clay and mud structure of Kooh-e Khajeh Zabol due to the penetration of moisture due to rain combined with sandstorms and wind

در رشتهٔ ژئو مکانیک، یکی از فاکتورهای مهمی که در خاک، مورد سنجش قرار می‌گیرد و از آن به عنوان یکی از ویژگی‌های مهم قابل اندازه‌گیری در خاک یاد می‌شود، ضریب‌نفوذپذیری[9] است که از داده‌های حاصل از اندازه-گیری کمّی آن در بسیاری از پژوهش‌ها در رشته‌های مختلف و علوم مهندسی که مبتنی بر استفاده از روش‌های پژوهش تجربی است، استفاده می‌شود. ضریب نفوذپذیری عبارت است از حجم آبی که از واحد سطح خاک، در واحد زمان عبور می‌کند؛ در واقع، ضریب نفوذپذیری معیاری است از مقدار مقاومت خاک در برابر حرکت آب، هنگامی که ویژگی‌هایی از آب که بر جریان آن، تأثیرگذار است، مورد توجه قرار گیرد [4].

نامنظم بودن دانه های خاک، موجب می‌شود که وقتی در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، فضاهایی میان آن‌ها ایجاد شود که اصطلاحاً به آن‌ها منفذ گفته می‌شود. منافذ میان دانه‌های خاک به یکدیگر مرتبط هستند و بدین ترتیب، گاز یا هر مایع دیگری، همچون آب می‌تواند از بین این منافذ حرکت کند که در این صورت، آن تودهٔ خاک را نفوذپذیر می‌گویند [8]. بررسی‌های انجام شده در حوزهٔ مکانیک و مهندسی خاک؛ حاکی از آن است که عمده‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ضریب نفوذپذیری خاک، که می‌توان برشمرد، شامل: ویسکوزیته سیال، توزیع اندازه منافذ خاک، دانه‌بندی خاک، نوع خاک، نسبت تخلخل، زبری ذرات کانی، درجه اشباع خاک، ساختار خاک، شکل و اندازه دانه‌های خاک و همچنین دما است [9]. با توجه به داده‌های حاصل از بررسی‌های فوق در علوم خاک، به نظر می‌رسد که به واسطهٔ کاربرد گستردهٔ خاک در بسیاری از مواد و مصالح مورد استفاده در ساخت بناهای تاریخی و فرهنگی به عنوان یکی از مهمترین بخش‌های تشکیل دهنده این مصالح، می‌توان گفت که در بسیاری از این مصالح سنتی، اعم از خشت، اندودها و ملات‌های قدیمی مورد استفاده در بناهای تاریخی و میراث معماری نیز همین عوامل می‌توانند در میزان نفوذپذیری و عایق‌بندی آن‌ها در مقابل آب و رطوبت تأثیرگذار باشند، هرچند اظهار نظر دقیق در این مورد نیازمند مطالعه و پژوهش‌های مبسوطی در این راستا است.

هدف از انجام این پژوهش، یافتن روش آزمایشگاهی علمی و استانداری است که بتوان به‌کمک آن، میزان عایق‌بندی مواد و مصالح به‌کار رفته در بناهای تاریخی و فرهنگی و میراث معماری را اندازه‌گیری کرد. در واقع، مسئلهٔ اصلی تحقیق در این پژوهش چگونگی اندازه‌گیری میزان عایق‌بندی مصالح سنتی مورد استفاده در بناهای تاریخی و فرهنگی در مقابل رطوبت است تا بدین ترتیب بتوان، از این روش تجربی برای بررسی و اندازه‌گیری کمّی میزان عایق‌بندی و فرسایش آن‌ها در گذر زمان استفاده کرد و بر این اساس، با استفاده از ارزیابی این متغیر مهم به بهسازی و تقویت مواد و مصالح سنتی به‌کار رفته در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی و فرهنگی و میراث معماری ارزشمند کمک کرد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

در سال ۱۸۵۶میلادی، مهندس جوان فرانسوی به‌نام هنری دارسی[10] با انجام آزمایش‌هایی به منظور بررسی و مطالعهٔ نحوهٔ حرکت آب در ماسه، دریافت که مقدار آبی که از محیط متخلخل ماسه در یک زمان معین گذر می‌کند، با سطح مقطع نمونه ماسه در جهت عمود بر حرکت آب، اختلاف بار هیدرولیکی حاصل از اختلاف سطح آب در ابتدا و انتهای نمونه و طول نمونه خاکی که در آن آب جریان دارد، متناسب است. به همین خاطر برای بیان حالت نفوذپذیری در یک محیط متخلخل نسبت به یک مایع از اصطلاح ضریب نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی (K) استفاده کرد [8]. در واقع، دارسی دبی عبوری را تابعی از سطح مقطع، ارتفاع و طول نمونه در نظر گرفت و ضریب ثابتی به نام هدایت هیدرولیکی (ضریب هدرولیکی) یا ضریب نفوذپذیری را معرفی کرد [9]. نکتهٔ مهم دیگری که در این ارتباط باید بدان توجه شود آن است که حرکت مایعات در محیطی متخلخل، فقط به اندازه، شکل و تعداد کانال‌های جریان بستگی ندارد و مستقل از خواص مایع است. روشن است که سهولت یا روانی حرکت مایع در محیط متخلخل به خصوصیات مایع در

حال حرکت در آن محیط، بستگی دارد که در این باره می‌توان به مواردی، همچون: وزن مخصوص و لزجت مایع اشاره کرد که خود تابع دما و درجه حرارت است [8].

شـــلهایم، نفوذپذیری ذاتی[11] را تابعی از خصوصـیات خـاک دانسته و همچنین گزارش کرده که نفوذپذیری ذاتی، مستقل از نـوع سیال و تنها تابع خواص خاک (مجذور شعاع خلل و فـرج) است [10]. شایدگر، نیز نفوذپذیری را به صورت توانایی سنگ یا خاک در عبـور سـیال از خـلال آن ارائه کرده است [11]. وی نیز نفوذپذیری ذاتی را به صورت ویژگی از سنگ یـا خاک مستقل از خواص سـیال می‌داند که تأثیرپـذیر از مؤلفـه‌هـایی مانند اندازه خلل و فرج، هندسه و نحوهٔ توزیع آن‌ها است [12].

به هر روی، نفوذپذیری، از مهمترین ویژگی‌های خاک است که اندازه‌گیری کمّی آن برای ما، اهمیت بسیاری دارد، چون داده‌های حاصل از این ویژگی مهم، در بسیاری از پژوهش‌ها، همچون مدل‌سازی بارش و رواناب، ارزیابی بهینه‌سازی مواد و مصالح و بررسی آسیب‌شناختی مصالح در مقابل آسیب ناشی از نفوذ رطوبت و بارندگی به داخل آن‌ها به‌کار می‌رود [13]. خاک‌ها و مصالحی که میزان نفوذپذیری آن‌ها اندک است، بخش کمتری از باران و رطوبت اندکی را به‌داخل خود نفوذ می‌دهند و در نتیجه رواناب و رسوب بیشتری تولید می‌کنند [14].

چون نفوذپذیری ذاتی، تابع خصوصیات خاک است و خواص خاک‌های گوناگون یکسان نیست، بنابراین میزان نفوذپذیری ذاتی خاک‌های مختلف، متفاوت است. عوامل متعددی بر شدت نفوذ آب در خاک و مصالح تأثیرگذار هستند که در این میان، برخی پژوهشگران، در این راستا، نقش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف خاک بر نفوذپذیری آن را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند [15]. توزیع اندازهٔ ذرات اولیه از جمله خواص فیزیکی بسیار مهم هر خاکی محسوب می‌شود که هوانگ و همکارانش از آن به‌عنوان ویژگی بنیادی خاک یاد کرده‌اند که به‌طور گسترده‌ای، این ویژگی مهم خاک برای تخمین هدایت هیدرولیکی، منحنی‌های رطوبتی و نفوذ مورد استفاده قرار می‌گیرد [16].

پژوهش‌های لادو و دیگران، حاکی از آن بوده است که نفوذپذیری ذاتی خاک با افزایش میزان رس، کاهش می‌یابد. همچنین این محققان به این نتیجه دست یافتند که افزایش در تورم در اثر عواملی نظیر آماس ناشی از حضور سدیم نیز می‌تواند موجب کاهش شدت نفوذ آب در خاک شود. از سوی دیگر حضور ذرات درشت‌تر نظیر شن نیز موجب افزایش شدت نفوذ می‌شود [17]. پایداری خاکدانه و ساختمان خاک نیز تأثیر بسیاری بر میزان نفوذپذیری خاک دارد. در این زمینه، مهمترین عامل، توزیع اندازهٔ ذرات ثانویه و توزیع فضای منافذ حاصل از آن‌ها است. به همین خاطر است که لین و دیگران، گزارش کرده‌اند که ۱۵ درصد از خلل و فرج بزرگ (بزرگتر از ۰/۵ میلیمتر) و خلل و فرج متوسط (۰/۵–۰/۶ میلیمتر) در حدود ۸۳ درصد جریان آب در خاک را کنترل می‌کند [18]. البته نفوذ آب و هدایت هیدرولیکی نه تنها به خلل و فرج موجود در خاک و مصالح، ارتباط و بستگی دارد، بلکه به شکل و پیوستگی آن‌ها نیز وابسته است [15]. وجود خاکدانه‌های درشت و پایدار، سبب افزایش هدایت هیدرولیکی و شدت نفوذ آب در خاک می‌شود. علاوه بر این، این اثر در شرایطی که ماده آلی و خاکدانه‌ها به دلیل سدیمی شدن پراکنده شوند، کاهش می‌یابد [17]. در این ارتباط، وزن مخصوص ظاهری که به عواملی همچون: میزان ماده آلی، توزیع اندازه ذرات و تراکم‌پذیری خاک وابسته است، نیز بر نفوذپذیری آن تأثیرگذار است [15].

بعضی از پژوهشگران، نقش ویژگی‌های شیمیایی را بر فرایند نفوذ آب در خاک مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعات اوستر و شینبرگ و همچنین هالیول و همکارانش حاکی از آن بوده است که مقادیر زیاد سدیم محلول، از طریق کاهش پایداری خاکدانه، پراکنده شدن ذرات و تورم رس‌های انبساط‌پذیر، موجب کاهش شدت نفوذ آب در خاک می‌شود. آن‌ها همچنین معتقد

هستند که این اثر مخرب، در حضور آهک و گچ کاهش می‌یابد [18, 19]. سدیم اثرات مخربی بر نفوذپذیری خاک دارد، به‌نحوی که پراکندگی ذرات، سبب کاهش نفوذ آب در خاک می‌شود [15]. مندال و همکارانش در مقابل، معتقد هستند که عوامل هماورکننده نظیر کلسیم، اثر مطلوبی بر نفوذپذیری دارد به همین خاطر، برخی محققان وجود آهک و گچ در خاک را دلیل افزایش نفوذپذیری دانسته‌اند [14].

بررسی‌های انجام شده بر روی ارتباط میزان نفوذپذیری خاک با بافت آن، حاکی از آن است که توزیع اندازه ذرات اولیه، تأثیر معنی‌داری در سطح بر میزان نفوذپذیری دارد. با افزایش درصد رس و سیلت، شدت نفوذ نهایی کاهش قابل توجهی می‌یابد. در مقابل، ذرات شن، ارتباط مثبت و معنی‌داری با افزایش میزان نفوذپذیری دارد. ذرات رس به دلیل اندازهٔ ریزتر، سبب کاهش اندازهٔ خلل و فرج موجود در خاک و مصالح می‌شوند و در نتیجه، میزان نفوذ نهایی را کاهش می‌دهند. ذرات سیلت نیز، هر چند از نظر اندازه و ابعاد، حدّ واسط ذرات رس و شن محسوب می‌شوند، ولی بررسی‌های انجام شده نشان داده‌اند که رفتاری نزدیکتر به رس دارند [15].

تحقیق دیویس و دیگران، نشان داده است که که نفوذ آب به طور معمول در خاک‌های سدیمی، به ویژه، آن‌هایی که pH و مقادیر سیلت و رس زیادی دارند، ضعیف است [21]. ذرات شن خلاف سایر اجزای بافت خاک و مصالح، به دلیل اندازه و ابعاد درشت‌تر موجب ایجاد ایجاد خلل و فرج بزرگتری می‌شوند و در نتیجه، افزایش در میزان نفوذپذیری نهایی خاک را به‌دنبال دارند [15]. این یافته‌ها با نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده توسط واناس و همکارانش، رومکنز و دیگران و نیز هوانگ و همکارانش مطابقت دارند، زیرا این پژوهشگران نیز به اثرات مثبت شن در افزایش میزان نفوذپذیری اشاره کرده‌اند [22, 23, 24].

لیو و دیگران و نیز لین و همکارانش نشان دادند که افزایش رطوبت اشباع در خاک می‌تواند موجب کاهش نفوذ آب در خاک شود. این پژوهشگران، دلیل این امر را تأثیر ذرات رس در افزایش رطوبت اشباع از یک سو و نقش آن در کاهش نفوذپذیری دانسته‌اند [25, 26].

با توجه به اهمیت بسیارِ مؤلفهٔ نفوذپذیری، ارائهٔ راهبردی مناسب برای اندازه‌گیری دقیق آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در علوم آب و خاک، به منظور ارزیابی و سنجش میزان نفوذپذیری آب در خاک، عاملی کلیدی ویژه‌ای تعریف شده است که به‌نام هدایت هیدرولیکی معروف است که عبارت است از: نسبت مقدار جریان آب عبوری در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، در واحد زمان از واحد سطح خاک، موقعی که تحت گرادیان هیدرولیک واحد باشد که آن را به K نمایش می‌دهند و یکای اندازه‌گیری آن نیز سانتیمتر بر ثانیه است.

امروزه برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاک با توجه به شرایط نمونه خاک و نوع بافت آن، بر اساس استانداردهای بین‌المللی دو روش مجزا و متفاوت ارائه شده است. آزمون با بار ثابت[12]و آزمون با بار افتان[13]. در روش اول، دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده برای انجام آزمون؛ یعنی دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری را طوری تنظیم می‌کنند که در آن، منبع تأمین آب واقع در ورودی دستگاه دارای بار آبی ثابتی باشد، به عبارت دیگر، اختلاف بار ورودی و خروجی دستگاه، در حین آزمون، ثابت باقی بماند ولی در روش دوم؛ یعنی اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک با بار افتان، اختلاف بار ورودی و خروجی آب در دستگاه، ثابت نیست و رو به کاهش است [27].

در یک جمع‌بندی کلی از نظرات ارائه شده در بالا، می‌توان گفت که با توجه به مطالعات انجام شده در زمینهٔ نفوذپذیری در خاک که بیشتر در حوزهٔ مهندسی آب، کشاورزی و علوم خاک انجام شده است به نظر می‌رسد که می‌توان از برخی از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی مورد استفاده در این علوم با رعایت الزامات و نیازهای متخصصان حوزهٔ حفاظت و مرمت و باستان‌سنجی به منظور ارزیابی برخی از ویژگی‌های مهم و مورد نظر در مواد و مصالح به‌کار رفته در بناهای تاریخی و میراث معماری، همچون خاصیت عایق‌بندی و

نفوذپذیری این مصالح در مقابل رطوبت و بارندگی استفاده کرد.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. روش پژوهش

این پژوهش کاربردی با استفاده از روش‌های پژوهشی تجربی- تحلیلی انجام شده است. برای جمع‌آوری داده‌ها از تکنیک‌های مختلف، شامل: مطالعهٔ کتابخانه‌ای، مطالعهٔ میدانی و بررسی آزمایشگاهی، استفاده شده است.

به منظور بررسی و ارزیابی روش آزمایشگاهی، تعیین ضریب نفوذپذیری برای اندازه‌گیری میزان عایق‌بندی مواد و مصالح سنتی در بناهای تاریخی در مقابل رطوبت و بارندگی، پس از تهیهٔ یک سری نمونه آزمایشگاهی از اندود کاهگل که در گذشته در بسیاری از بناهای تاریخی، محوطه‌های باستان‌شناختی و میراث معماری ما در ایران برای عایق‌بندی آن‌ها در مقابل رطوبت و بارندگی استفاده می‌شده است، ضریب نفوذپذیری آن‌ها، طبق استانداردهای موجود در این روش آزمایشگاهی، اندازه‌گیری شد و سپس نتایج به‌دست آمده به منظور بررسی قابلیت‌ها و محدودیت‌های روش آزمایشگاهی فوق برای بررسی و مطالعهٔ کمّی ویژگی‌های مواد و مصالح سنتی در ابنیه تاریخی و فرهنگی و میراث معماری، مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

با توجه به آن چه پیشتر گفته شد، چون، خاصیت عایق بندی مصالح ساختمانی، همچون اندود کاهگل در مقابل رطوبت، در بناهای تاریخی، ارتباط مستقیمی با میزان نفوذ رطوبت به داخل مصالح دارد، به همین دلیل، به نظر می‌رسد که می‌توان به منظور اندازه‌گیری کمّی خاصیت عایق‌بندی در مصالح تاریخی و سنتی، همچون کاهگل، با تعیین میزان نفوذپذیری این مصالح به شیوه‌ای علمی و استاندارد به این هدف دست یافت. بنابراین برای نیل به این مقصود در این پژوهش از آزمون استاندارد تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان برای اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق-بندی اندود کاهگل در مقابل رطوبت و بارندگی استفاده شد. لازم به ذکر است که از این روش آزمایشگاهی، همان طور که پیشتر بدان اشاره شد، بیشتر در مهندسی کشاورزی، مهندسی آب و علوم خاک برای اندازه گیری میزان نفوذپذیری خاک مورد استفاده در مزارع برای بهبود میزان نفوذ آب در هنگام آبیاری استفاده شده است و به‌کارگیری آن در راستای تعیین میزان نفوذ و خاصیت عایق‌بندی مواد و مصالح به ویژه مصالح خاکی و مصالح بنایی به کار رفته در بناهای تاریخی و میراث معماری بی‌سابقه است، از این منظر با توجه به تغییراتی که متناسب با اهداف مورد نظر در این پژوهش در این روش داده شده است و متناسب‌سازی آن با خواست‌ها و نیازهای مورد نظر در مطالعات باستان‌سنجی و دانش حفاظت و مرمت، روش به‌کار رفته جدید و ابتکاری است.

در حقیقت، در این تحقیق برای نخستین بار از این آزمون و روش آزمایشگاهی برای ارزیابی و سنجش خاصیت عایق بندی و میزان نفوذپذیری در برخی از مصالح به‌کار رفته در بناهای تاریخی و میراث معماری، همچون اندود کاهگل استفاده شده است تا قابلیت و توانایی این روش برای ارزیابی و سنجش میزان نفوذپذیری رطوبت و بررسی تغییرات و نوسانات میزان نفوذ آب به داخل اندود کاهگل و به تبع آن، میزان کارآمدی این روش در ارزیابی خاصیت عایق‌بندی این اندود باستانی در مقابل رطوبت و بارندگی، در بناهای تاریخی روشن و مشخص شود و بدین ترتیب قدمی هرچند کوچک در تحقق توسعه و استاندارد کردن آزمون‌های تجربی و معرفی شیوه‌های جدید آزمایشگاهی مورد استفاده در بررسی و مطالعه مواد و مصالح به‌کار رفته در بناهای تاریخی و فرهنگی و میراث معماری برداشته شود.

۳-۲. راهبردهای نحوهٔ انجام مطالعهٔ آزمایشگاهی و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای این کار، پس از انتخاب خاک مناسب (شکل ۳) و دستیابی به نسبت ترکیب بهینهٔ خاک و الیاف کاه از طریق مطالعهٔ آزمایشگاهی (شکل ۴)، تأثیر اضافه کردن چند نمونه افزودنی مختلف به ترکیب اندود کاهگل، برای

بهسازی این اندود به منظور بهبود خاصیت عایق‌بندی آن (شکل ۶) از طریق اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه-های کاهگل با بار افتان در شرایط یکسان آزمایشگاهی در نوبت‌های متوالی، بارها، مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت و سپس نتایج به‌دست آمده در قالب جداول و نمودارهایی ارائه و تجزیه و تحلیل شد.

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف اندود کاهگل از نظر نسبت ترکیب اختلاط خاک و درصد وزنی میزان الیاف کاه مورد استفاده با ثابت گرفتن نوع خاک و الیاف به‌کار رفته، مشخص شد که بهترین نسبت ترکیب برای تهیهٔ اندود کاهگل مناسب، استفاده از ۵ درصد وزنی الیاف کاه گندم در ترکیب با خاک و آب و عمل‌آوری و ماندگاری آن تحت رطوبت به میزان حداقل ۷۲ ساعت است، زیرا در این نسبتِ ترکیب، علاوه بر داشتن مقاومت فشاری و مقاومت کششی مناسب، میزان انقباض و ترک خوردگی ملات نیز، کم بود و اندود کاهگل حاصله، استحکام، انسجام و یکدستی مناسبی داشت [28].

شکل ۳: خاک انتخابی برای تهیهٔ اندود کاهگل
Fig. 1: Selected soil for to prepare Kahgel plaster

شکل ۴: خاک مخلوط شده با الیاف کاه برای تهیه کاهگل
Fig. 2: Soil mixed with straw fibers to prepare Kahgel plaster

شکل ۵: نمونه کاهگل معمولی شاهد تهیه شده برای آزمایش
Fig. 3: A typical control Kahgel sample prepared for testing

شکل ۶: نمونه کاهگل بهسازی شده با مواد افزودنی
Fig. 4: Kahgel sample improved with additives

برای انجام این آزمون از سه دستگاه استوانه‌ای نفوذسنجی یکسان از جنس آلیاژ برنج که برای آزمایش-های ژئوتکنیکی خاک به‌کار می‌رود، استفاده شد (شکل ۷-۸). نمونه های اندود کاهگل قرار داده شده در این دستگاه-های نفوذسنجی با بار افتان، همه، دارای مشخصات یکسانی بودند که این مشخصات عبارت بودند از: نمونه-هایی از اندود کاهگل با قطر ۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳/۵

سانتیمتر که در تمامی آن‌ها، ویژگی‌های مختلف نمونه، اعم از : مقدار خاک مصرفی، نوع خاک، دانه‌بندی خاک، نوع الیاف کاه، میزان الیاف، مقدار آب مصرفی برای تهیه کاهگل، شیوه آماده‌سازی کاهگل، نحوه عمل‌آوری، مدت زمان عمل‌آوری، ابعاد و وزن نمونه؛ همسان در نظر گرفته شد. پس از تهیهٔ هر ترکیبی از اندود کاهگل، از آن ترکیب، سه نمونه آماده و بعد هر یک از آن‌ها به‌طور جداگانه در درون سه دستگاه همسان نفوذسنجی قرار داده شد و به طور همزمان، هر سه نمونه در شرایط یکسان مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت. در این آزمایش، ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل تهیه شده، تحت شرایط فوق با روش اندازه‌گیری این مؤلفه با بار افتان، مطابق با شیوهٔ استاندارد اندازه‌گیری ASTM D2434-68، بعد از رسیدن نمونه تحت آزمایش به حالت اشباع و نیل به وضعیت تعادل و پایداری در داخل دستگاه نفوذسنج، در هر شبانه روز حداقل ۲۴ نوبت پیاپی، جمعاً ۷۲ بار مورد سنجش قرار گرفت و اندازه‌گیری شد (شکل ۱۰).

به منظور ارزیابی قابلیت و کارایی روش آزمایشگاهی مورد مطالعه در اندازه‌گیری تغییرات میزان نفوذپذیری و عایق-بندی اندود کاهگل، ضریب نفوذپذیری اندود هم در نمونه-های کاهگل عادی و هم در نمونه‌های گاهگل بهسازی شده، با مواد افزودنی به منظور ارتقای خاصیت عایق‌بندی کاهگل، مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفت؛ یعنی ضریب نفوذپذیری با بار افتان در نمونه‌های اندود کاهگل عادی با نسبت ترکیب ثابت به‌عنوان نمونه شاهد و کنترل اندازه‌گیری شد و سپس مجدداً ضریب نفوذپذیری با بار افتان در نمونه‌های اندود کاهگل بهینه شده با افزودنی‌های مختلف معدنی در مقایسه با نمونه‌های شاهد اندازه‌گیری شد. همچنین برای بهسازی و ارتقای خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل از مواد افزودنی مختلفی، شامل: میکروسیلیس، فلدسپات، کائولن و بنتونیت میکرونیزه با دانه‌بندی‌های مختلف ۱۵۰ و ۴۵ میکرون در دو غلظت ۳ و ۶ درصد وزنی استفاده شد (جدول ۳).

شکل ۷: دستگاه اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری در مقابل آب
Fig. 5: Water permeability measuring device

شکل ۸: اجزای مختلف دستگاه اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری
Fig. 6: Different components of the permeability measuring device

۳-۳. ارزیابی عایق‌بندی نمونه‌های مصالح تاریخی با اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری با بار افتان

همان طور که پیشتر گفته شد، آزمون تعیین ضریب نفوذپذیری در آزمایشگاه به دو روش انجام می‌شود: تعیین ضریب نفوذپذیری با بار ثابت و تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان که در روش اول، آب با جریانی آرام و باری ثابت در نمونه حرکت می‌کند و به همین خاطر این روش برای تعیین نفوذپذیری مواد و مصالح درشت‌دانه، اختصاص یافته است ولی از روش دوم (بار افتان) برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه استفاده می‌شود، چون نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ریز کم است و همین امر موجب

می‌شود که در صورت استفاده از روش اول (بار ثابت) به‌دلیل طولانی شدن مدت آزمایش، آب مورد استفاده در دستگاه، تبخیر و در نتایج آزمایش خطا ایجاد شود و از طرفی، چون حرکت آب در داخل نمونه در این روش، بسیار آرام است و با تغییر بار آبی در طول آزمایش صورت می‌گیرد، قرائت صحیح و دقیق مقدار آب عبور کرده از خاک ریزدانه با این روش ممکن نخواهد بود [29].

حجم آب عبوری از خاک، بیشتر به ابعاد و اندازهٔ حفرات موجود در خاک بستگی دارد تا حجم کل حفره‌های خاک، به همین خاطر مقدار ضریب نفوذپذیری (K)، خاک‌های درشت‌دانه بیشتر از خاک‌های ریزدانه است. با توجه به این که در توده خاک، حفره‌ها، تقریباً به اندازه و ابعاد دانه‌های خاک است، نفوذپذیری زیاد خاک‌های درشت‌دانه، به دلیل آن است که سرعت حرکت آب در خاک‌های درشت دانه به خاطر اصطکاک کمتر بین آب و جدارهٔ منافذ موجود در این خاک‌ها کمتر از خاک‌های ریزدانه است [8].

برای انجام این آزمایش و اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل تهیه شده با بار افتان، مطابق با استاندارد ASTM D2434-68 از یک دستگاه سنجش نفوذپذیری با بار افتان استفاده شد که این دستگاه را هم می‌توان با توجه به نیاز، شخصاً از مواد و مصالح مختلف، همچون پلاکسی گلاس و یا فلزات آلیاژی ضد زنگ، همچون آلیاژ برنج ساخت و یا از نمونه‌های آمادهٔ موجود در بازار استفاده کرد. مهمترین نکته در ساخت دستگاه نفوذسنج، دقت در صحیح بودن عدد اندازهٔ قطر داخلی و ارتفاع استوانه نفوذسنج در راستای سهولت انجام محاسبات و همچنین آب‌بندی دقیق سر و ته استوانه از طریق به‌کارگیری اورینگ‌های لاستیکی مناسب به منظور جلوگیری از نشتی آب و ایجاد خطا در آزمایش است. علاوه بر این دستگاه، بورت آزمایشگاهی با دقت زیاد، دماسنج و زمان‌سنج از دیگر وسایل و تجهیزاتی است که برای انجام این آزمون به آن‌ها نیاز داریم.

برای شروع آزمایش، بورت را روی پایهٔ مخصوص آن، نصب می‌کنیم و آن را در بالای دستگاه نفوذسنج قرار می‌دهیم. پس از قرار دادن نمونه آزمایشگاهی مورد نظر، در داخل استوانهٔ مخصوص دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری، درب محفظهٔ استوانه‌ای دستگاه را پس از قرار دادن اورینگ لاستیکی مخصوص آب‌بندی آن، محکم می‌بندیم و سپس، بورت را با آب پر می‌کنیم و با باز کردن شیر خروجی پایین بورت و شیر ورودی بالای دستگاه نفوذسنج، جریان آب را از طریق بورت و به‌کمک یک لوله پلاستیکی وارد دستگاه و استوانهٔ نفوذسنجی می‌کنیم و از نمونه آزمایشگاهی اندود کاهگل قرار گرفته در داخل دستگاه، عبور می‌دهیم (شکل ۱۰). در طول آزمایش باید از عدم نشتی آب از بدنهٔ دستگاه نفوذسنج با وارسی مداوم آن؛ اطمینان حاصل کنیم. وقتی که نمونه مورد نظر قرار گرفته در داخل دستگاه نفوذسنج، کاملاً از آب اشباع و استوانهٔ نفوذسنج از آب پر شد و دستگاه به حالت تعادل رسید، از زمان شروع جریان آب، زمان‌سنج را به‌کار می‌اندازیم و تا موقع بستن شیر بورت، مدت زمان گذشته از شروع آزمایش را ثبت می‌کنیم (شکل ۱۰). در طول این مدت زمان، اختلاف بار آبی و میزان کاهش ارتفاع آب در داخل بورت را از طریق اختلاف حاصل از کاهش ارتفاع آب از h_1 به h_2 در طول مدت زمان گذشته و سنجیده شده به کمک زمان‌سنج، تعیین می‌کنیم و با توجه به میزان آن و دمای آب، ضریب نفوذپذیری نمونه (K) ، را با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌کنیم:

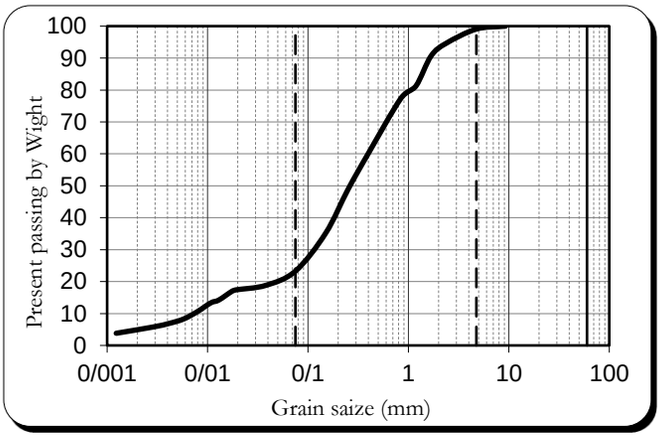
$$K = 2.303\ \frac{aL}{At}\ Log\frac{h_1}{h_2}$$

در فرمول بالا، K: ضریب نفوذپذیری نمونه بر حسب سانتیمتر بر ثانیه و یا متر بر ثانیه است؛ a: سطح مقطع داخلی بورت به سانتیمتر مربع است؛ t: انقضای زمان به ثانیه است، A: سطح مقطع نمونه کاهگل مورد آزمایش بر حسب سانتیمتر مربع است؛ L: طول نمونه کاهگل قرار داده شده در داخل استوانه نفوذسنجی است؛ h_1: بار آبی یا ارتفاع آب داخل بورت که بر روی نمونه است، قبل از شروع آزمایش در زمان $t=0$ است؛ h_2: ارتفاع آب روی نمونه یا بار آبی در انتهای آزمون یا در زمان $t=T$ است و log: لگاریتم بر مبنای لگاریتم طبیعی (نپرین) بر مبنای پایه 2.7182818 است. به‌طور

معمول، برای هر نمونه این آزمایشT باید حداقل ۳ مرتبه تکرار شود [27, 29, 30].

۳-٤. خاک مورد استفاده برای تهیهٔ اندود کاهگل

خاک مورد استفاده در این پژوهش، برای تهیه نمونه‌های ملات کاهگل مورد آزمایش از منطقهٔ دشت مهیار در جنوب اصفهان تهیه شد و سپس ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آن، شامل: درصد مواد آلی، درصد رطوبت، دانه‌بندی، حدود آتربرگ، چگالی ویژه، pH، هدایت الکتریکی و درصد انقباض خطی آن، با روش‌های استاندارد به شرح زیر، مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۹ و جدول ۱ و ۲)که نتایج آن، بدین شرح است:



شکل ۹: نمودار دانه‌بندی خاک انتخابی برای تهیه اندود کاهگل
Fig. 7: Gradation curves for selected soil to prepare Kahgel plaster

جدول ۱: نتایج آزمایش دانه‌بندی خاک انتخابی برای تهیه کاهگل
Table 1: The results of testing Gradation for

درصد شن % Gravel	0.92
درصد ماسه % Sand	80.44
درصد لای % Silt	18.65
درصد رس % Clay	4.63
D10	0.007
D30	0.111
D60	0.397
Cc	4.25
CU	54.21
طبقه‌بندی خاک آشتو Soil classification on Ashto system	A-2-4(0)
طبقه‌بندی خاک متحد Soil classification on Unified system	SC- Clayey Sand

جدول ۲: نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی و شیمیایی خاک انتخابی برای تهیه کاهگل
Table 2: Geotechnical and chemical tests on selected Soil to prepare Kahgel plaster

نوع آزمون Type of test	کد استاندارد ازمون Standard cods	روش آزمون Method	نتیجه Results
تعیین حد روانی خاک (LL) Liquid Limit	ASTM D4318-98	دستگاه کاساگرانده Casagrande device	21.5
تعیین حد خمیری خاک (PL) Plastic Limit	ASTM D4318-98	کردن فتیله روش Rolling soil method	12.2
تعیین دامنه خمیری خاک (PI) Plasticity Index	ASTM D4318-98	اختلاف حد روانی و حد خمیری Difference between the liquid and plastic limits	9.3
خاک دانه‌بندی Grain size analysis	ASTM D422-87	استفاده از الک و هیدرومتری Sieves & hydrometer	Table 3
درصد رطوبت خاک Soil moisture content (%)	ASTM D4643-00	خشک کردن در آون Oven drying	2.34
وزن مخصوص نسبی خاک Specific gravity of soil	ASTM D854-02	استفاده از پیکنومتر Pycnometer	2.69
درصد انقباض خطی خاک Linear shrinkage (%)	BS 1377- Part 2	استفاده از قالب و آون Molds & oven drying	6.09
pHخاک Soil pH test	ASTM D4972	روش پتانسیومتری Potentiometry	7.81
خاک درصد مواد آلی Organic Content (%)	ASTM D2974	حرارت در کوره Loss on ignition (LOI)	1.71
هدایت الکتریکی خاک Soil electrical conductivity (EC)	ASTM D4972	دستگاه هدایت سنج Conductivity meter device	1.13

۳-۵. مواد افزودنی مورد استفاده برای بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل

به منظور سنجش میزان کارایی روش آزمایشگاهی مورد نظر در اندازه‌گیری کمّی تغییرات میزان نفوذپذیری و به‌تبع آن خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل، علاوه بر اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری کاهگل معمولی، به‌عنوان نمونه‌های شاهد، این مؤلفهٔ فیزیکی در نمونه‌های اندود کاهگل بهینه‌سازی شده با افزودنی‌های معدنی نیز سنجیده شد. برای بهسازی خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل سنتی به ویژه خاصیت عایق‌بندی آن در مقابل رطوبت و بارندگی که اصلی‌ترین خصوصیت این اندود حفاظتی در بناهای تاریخی و میراث معماری خشت و گلی است از مواد افزودنی مختلفی با دانه‌بندی ۱۵۰ و ۴۵ میکرون استفاده شد که همان‌طور که پیشتر گفته شد، شامل: میکروسیلیس، فلدسپات، کائولن و بنتونیت در دو غلظت ۳ و ۶ درصد بود که مشخصات آن‌ها، طبق جدول ۳ به این شرح است:

جدول ۳: مشخصات افزودنی‌های معدنی میکرونیزه مورد استفاده
Table 3: Specifications of micronized mineral additives used

نام افزودنی Additive name	شکل فیزیکی Appearance	رنگ افزودنی Color	محل تهیه Place of preparation
میکروسیلیس Microsilica	پودر جامد Solid powder	سفید white	شرکت توما اصفهان Toma Isfahan company
فلدسپات Feldspar	پودر جامد Solid powder	سفید white	شرکت توما اصفهان Toma Isfahan company
کائولن Kaolin	پودر جامد Solid powder	سفید white	دانشگاه هنر اصفهان Art University of Isfahan
بنتونیت Bentonite	پودر جامد Solid powder	کرم روشن Light ochre	دانشگاه هنر اصفهان Art University of Isfahan

٤. نتایج و بحث در یافته‌ها

٤-١. اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه-های کاهگل با بار افتان

برای این منظور، از هر ترکیب اندود کاهگل، سه نمونه مجزا به شکل استوانه‌ای با ابعاد مشخص و یکسان، تهیه شد و سپس ضریب نفوذپذیری آن‌ها با روش آزمون با بار افتان طبق استاندارد مربوطه، چنانچه پیشتر گفته شد بعد از اشباع شدن نمونه‌های کاهگل مورد آزمایش از آب و پس از رسیدن آن‌ها به وضعیت تعادل و پایداری در ظرف هر شبانه روز ۲۴ بار و مجموعاً ۷۲ نوبت پیاپی مورد سنجش قرار گرفت (شکل ۱۰) و بعد از محاسبهٔ مقادیر به‌دست آمده، میانگین مقادیر حاصل از مجموع ۷۲ نوبت اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل، به عنوان نتیجه نهایی آزمون برای تعیین و ارزیابی این روش در تعیین ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل با بار افتان استفاده شد.

شکل ۱۰: تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل با بار افتان با دستگاه نفوذسنج

Fig. 8: Determination of hydraulic conductivity of Kahgel plaster samples with falling head with permeameter

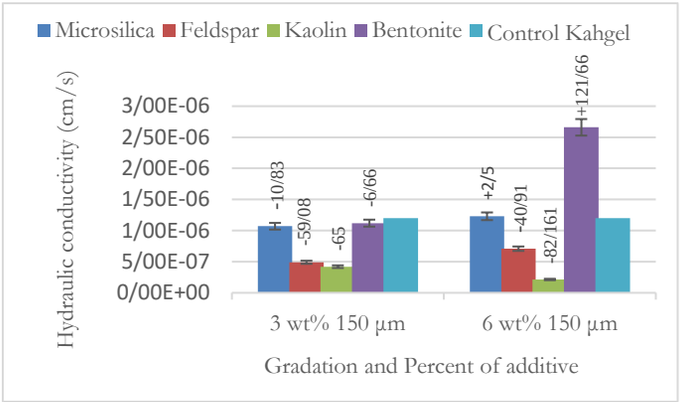
در این مرحله از آزمایش، ابتدا ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل عادی (کاهگل شاهد و کنترل)، اندازه‌گیری شد و بعد در ادامه کار، ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل جدیدی که با استفاده از افزودنی‌های معدنی بهینه‌سازی شده بودند به این روش تعیین شد. در خاتمه، نتایج حاصل از تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل عادی (نمونه‌های شاهد) با نمونه‌های اندود کاهگل جدید بهسازی شده با مواد افزودنی با یکدیگر قیاس شد (جداول ۴ و ۵ و اشکال ۱۱ و ۱۲). چون تغییرات و نوسانات کاهشی و افزایشی ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های اندود کاهگل بهینه‌سازی شده با مواد افزودنی بر مبنای نتایج حاصل از تعیین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های کاهگل شاهد؛ مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گرفت، بنابراین در تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل شاهد و کنترل، بسیار دقت و احتیاط شد و به همین خاطر، ضریب نفوذپذیری این نمونه‌ها، در نوبت‌های بیشتری از تعداد مرسوم و ذکر شده در قسمت‌های پیشین، در ۳۴۰ نوبت پیاپی، اندازه‌گیری شد و سپس میانگین حاصل از مقادیر به‌دست آمده از این ۳۴۰ نوبت آزمایش، به عنوان نتیجه نهایی و مبنا و معیار، اساس قیاس نمونه-های کاهگل بهسازی شده با نمونه‌های کاهگل شاهد، قرار گرفت تا نتایج حاصل از بررسی و ارزیابی تغییرات ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل، از نمونه‌های عادی شاهد به سمت و سوی نمونه‌های کاهگل بهسازی شده در ارزیابی و سنجش این روش آزمایشگاهی، با توجه به تعداد کثیر نمونه‌های آزمایشگاهی و تکرار بسیار زیاد آزمون‌ها، قابل تعمیم، استناد و معتبر باشد.

جدول ۴: نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل با افزودنی‌های ۱۵۰ میکرون
Table 4: The results of testing hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with 150- micron additives

نام افزودنی و درصد آن Additive & Percent	ضریب نفوذپذیری cm/s Hydraulic conductivity (cm/s)	درصد تغییر K نسبت به نمونه شاهد Variation compared to the control samples (%)	درصد تغییر K نسبت به نمونه ۳ درصد Variation compared to the (%) samples with 3% by weight additives
۳ درصد میکروسیلیس 3% Microsilica	1.07×10^{-6}	-10.83	-
۶ درصد میکروسیلیس 6% Microsilica	1.23×10^{-6}	+2.5	+13.33
۳ درصد فلدسپات 3% Feldspar	4.91×10^{-7}	-59.08	-
۶ درصد فلدسپات 6% Feldspar	7.09×10^{-7}	-40.91	+18.17
۳ درصد کائولن 3% Kaolin	4.2×10^{-7}	-65	-
۶ درصد کائولن 6% Kaolin	2.14×10^{-7}	-82.16	-49.04
۳ درصد بنتونیت 3% Bentonite	1.12×10^{-6}	-6.66	-
۶ درصد بنتونیت 6% Bentonite	2.66×10^{-6}	+121.66	+137.5
کاهگل عادی Control Kahgel	1.2×10^{-6}	-	-

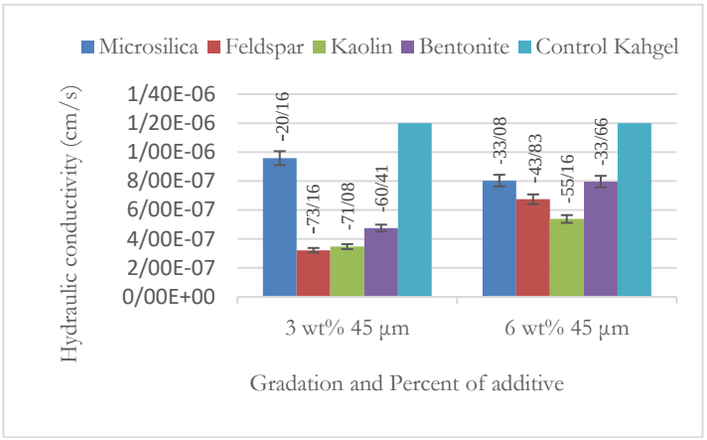
جدول ۵: نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل با افزودنی‌های ۴۵ میکرون
Table 5: The results of testing hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with 45- micron additives

نام افزودنی و درصد آن Additive & Percent	ضریب نفوذپذیری cm/s Hydraulic conductivity (cm/s)	درصد تغییر K نسبت به نمونه شاهد Variation compared to the control samples (%)	درصد تغییر K نسبت به بهسازی نمونه‌ها با افزودنی ۱۵۰ میکرون Variation compared to the (%) samples with 150 µm
۳ درصد میکروسیلیس 3% Microsilica	9.58×10^{-7}	-20.16	-9.33
۶ درصد میکروسیلیس 6% Microsilica	8.03×10^{-7}	-33.08	-35.58
۳ درصد فلدسپات 3% Feldspar	3.22×10^{-7}	-73.16	-14.08
۶ درصد فلدسپات 6% Feldspar	6.74×10^{-7}	-43.83	-2.92
۳ درصد کائولن 3% Kaolin	3.47×10^{-7}	-71.08	-6.08
۶ درصد کائولن 6% Kaolin	5.38×10^{-7}	-55.16	+27
۳ درصد بنتونیت 3% Bentonite	4.75×10^{-7}	-60.41	-53.75
۶ درصد بنتونیت 6% Bentonite	7.96×10^{-7}	-33.66	+88
کاهگل عادی Control Kahgel	1.2×10^{-6}	-	-



شکل ۱۱: نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل با افزودنی‌های مختلف ۱۵۰ میکرون در مقایسه با کاهگل شاهد

Fig. 9: Diagram of changes in the hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with 150- micron different additives compared to conventional samples



شکل ۱۲: نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل با افزودنی‌های مختلف ۴۵ میکرون در مقایسه با کاهگل شاهد

Fig. 10: Diagram of changes in the hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with 45- micron different additives compared to conventional samples

۲-٤. بحث در یافته‌ها

بررسی و ارزیابی نتایج به‌دست آمده از تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های اندود کاهگل تهیه شده با افزودنی‌های معدنی مختلف در مقایسه با اندود کاهگل عادی شاهد، نشان داد که افزودنی‌های مورد استفاده، شامل: میکروسیلیس، فلدسپات، کائولن و بنتونیت تأثیر مثبتی در تقلیل ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل در برابر نفوذ آب دارد، به‌طوری که بر اساس نتایج حاصل از استفاده از این روش آزمایشگاهی، بیشتر مواد افزودنی مورد استفاده موجب کاهش ضریب نفوذپذیری کاهگل شده‌اند که در میان آن‌ها، کاربرد کائولن، فلدسپات و میکروسیلیس به ترتیب بیشترین تأثیر را در بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل به‌دنبال داشته است و بنتونیت در رتبهٔ آخر است (جداول ۴ و ۵ و اشکال ۱۱ و ۱۲).

استفاده از افزودنی‌های کائولن، فلدسپات و میکروسیلیس به مقدار ۳ درصد وزنی با دانه‌بندی ۱۵۰ میکرون، ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل بهسازی شده را به ترتیب، ۶۵، ۵۹ و ۱۰/۸۳ درصد تقلیل می‌دهد و با فزونی درصد مواد افزودنی مورد استفاده در کاهگل در نمونه‌هایی که در آن‌ها از افزودنی کائولن و فلدسپات به مقدار ۶ درصد وزنی، استفاده شده است به ترتیب شاهد کاستی به میزان ۸۲ و ۴۰/۹۱ درصد در ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل می‌باشیم (جدول ۴ و شکل ۱۱). افزون بر این، نتایج به دست آمده از این پژوهش حاکی از آن است که با

کاستن از ابعاد ذرات افزودنی‌های معدنی مورد استفاده از ۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، تأثیر این افزودنی‌ها در تقلیل میزان ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل ارتقاء می‌یابد (جدول ۵ و شکل ۱۲)، به‌طوری که استفاده از ۳ درصد از مواد افزودنی ۴۵ میکرون از نوع میکروسیلیس، فلدسپات، کائولن و بنتونیت، ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل را به ترتیب،۲۰/۱۶، ۷۳/۱۶، ۷۱/۰۸ و ۶۰/۴۱ درصد کاهش داده است و با افزایش غلظت این مواد افزودنی به ۶ درصد، روند کاهشی ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل بهسازی شده نسبت به کاهگل شاهد ادامه می‌یابد، ضمن آن که استفاده از مواد افزودنی ۴۵ میکرون که از نظر ابعاد کوچکتر و دانه ریزتر از مواد افزودنی ۱۵۰ میکرون است، در غلظت‌های یکسان ۳ و ۶ درصد نسبت به نمونه‌های کاهگلی که با مواد افزودنی ۱۵۰ میکرون بهسازی شده‌اند، کاهش ضریب نفوذپذیری بیشتری را نشان می‌دهد که حاکی از تأثیر مثبت کاهش ابعاد و اندازهٔ ذرات مواد افزودنی در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل و بهبود و ارتقای خاصیت عایق‌بندی آن است (جدول ۵ و شکل ۱۲). بنابراین به نظر می‌رسد که با استفاده از این افزودنی‌های معدنی می‌توان، نفوذپذیری اندود کاهگل را به‌طور چشمگیری کاهش و خاصیت عایق‌بندی آن را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

بدین ترتیب، مشاهده می‌شود که مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی اندود کاهگل به روش جدید آزمایشگاهی معرفی شده در این پژوهش و نتایج کمّی به‌دست آمده از به‌کارگیری آن برای ارزیابی و سنجش میزان نفوذپذیری و مهمترین ویژگی عملکردی اندود کاهگل؛ یعنی خاصیت عایق‌بندی آن در مقابل بارش و رطوبت و به‌تبع آن دوام این اندود سنتی و باستانی در مقابل فرسایش محیطی، به‌خوبی نشان داد که با توجه به کارایی و قابلیت‌های مطلوب این روش آزمایشگاهی علمی و استاندارد، می‌توان از آن، به سهولت برای اندازه‌گیری دقیق این ویژگی مهم مصالح به صورت کمّی است.

۵. نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده در این پژوهش به شیوهٔ تجربی در حوزهٔ مطالعه آزمایشگاهی مواد و مصالح به‌کار رفته در محوطه‌های باستانی، بناهای تاریخی و میراث معماری نشان داد که با توجه به نتایج اخذ شده در آزمایش‌ها، از روش آزمایشگاهی تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان می‌توان به عنوان یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری کمّی تغییرات میزان نفوذپذیری و عایق‌بندی مواد و مصالح در مقابل رطوبت استفاده کرد. مطالعهٔ آزمایشگاهی اندود کاهگل و بررسی خاصیت نفوذپذیری و عایق‌بندی آن در مقابل رطوبت، به‌خوبی حاکی از قابلیت مطلوب این روش آزمایشگاهی علمی و استاندارد در مطالعهٔ تجربی این مؤلفه-های مهم در این اندود بود که در جریان آن تغییرات نفوذپذیری و میزان عایق‌بندی این اندود تاریخی به طور دقیق با توجه به نتایج به دست آمده از بهسازی اندود کاهگل با مواد افزودنی، در مقایسه با نمونه‌های شاهد، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که با به‌کارگیری این روش آزمایشگاهی به‌خوبی امکان بررسی میزان تأثیر مواد افزودنی در بهبود و یا افت میزان نفوذپذیری و عایق‌بندی اندود کاهگل در مقابل رطوبت، فراهم می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که روش آزمایشگاهی پیشنهادی و معرفی شده، قابلیت خوبی در اندازه‌گیری کمّی میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق‌بندی مواد و مصالح مورد استفاده در بناهای تاریخی و محوطه‌های باستانی دارد که به کمک آن می‌توان، به سهولت تمامی مواد و مصالح سنتی و بنایی به‌کار رفته در بناهای تاریخی و محوطه‌های باستانی را با این روش، مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

چون در هنگام استفاده از این روش آزمایشگاهی، میزان نفوذپذیری رطوبت بعد از گذر نمونه مورد آزمایش از مرحله جذب آب به وضعیت اشباع و سپس رسیدن آن به حالت تعادل و پایداری تعیین می‌شود، بنابراین، شرایط و نحوهٔ کنش آب در هنگام جذب آن توسط نمونه و نفوذ آن به درون لایه‌های مختلف مواد و مصالح تاریخی و باستانی مورد آزمایش تا حد زیادی در این آزمون، بازسازی می‌شود و بدین ترتیب می‌توان با استفاده از این روش آزمایشگاهی،

شیوهٔ عملکرد واقعی مواد و مصالح را در بناهای تاریخی و میراث معماری در هنگام نفوذ آب در زمان رویارویی با رطوبت و بارندگی تعیین کرد؛ اما، همواره باید به این نکتهٔ مهم توجه داشت که در این روش آزمایشگاهی، بازسازی وضعیت نفوذپذیری و نحوهٔ واکنش مصالح تاریخی مورد آزمایش، در مقابل بارش و رطوبت در مقیاسی کوچکتر به روشی کمّی برای ما ارائه می‌شود. آن چه که اهمیت استفاده از این روش آزمایشگاهی را برای ما در پژوهش‌های باستان-سنجی و حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی دو چندان می‌کند، آن است که با استفاده از این روش آزمایشگاهی استاندارد، می‌توان میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق‌بندی مواد و مصالح مختلف تاریخی را در محوطه‌های باستانی و میراث معماری در مقابل بارندگی و رطوبت به‌صورت کمّی در شرایط اشباع تعیین کرد. افزون بر این، سهولت کاربرد، صرفهٔ اقتصادی، سادگی و کارایی این روش آزمایشگاهی، سبب می‌شود که بتوان به آسانی از این آزمون استاندارد در مطالعات تجربی مبتنی بر به‌کارگیری روش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی مواد و مصالح تاریخی و بهسازی آن‌ها، استفاده کرد. در استفاده از این روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌های ملات‌های جدید مرمتی به‌سادگی می‌توان با توجه به شکل‌پذیری آن‌ها، نمونه‌های مورد نیاز را برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری و خاصیت عایق‌بندی آن‌ها با بار افتان، داخل دستگاه نفوذسنج قرار داد ولی برای ارزیابی نمونه‌های صلب و سخت، باید از روش مغزه‌گیری به کمک مته‌های مخصوص این کار استفاده کرد و پس از تهیه و آماده‌سازی نمونه به شیوه مندرج در این مقاله، ضریب نفوذپذیری نمونه را به سهولت به صورت کمّی اندازه‌گیری کرد.

سپاسگزاری

در نگارش این مقاله از حمایت‌های دانشگاه زابل در قالب پژوهانه با کد IR-UOZ- GR-7987 استفاده شده است که بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه، تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1. ASTM
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
3. British Standards Institute (BS)
4. Deutsches Institut für Normung (DIN)
5. Insulation
6. Water proofing
7. Penetration
8. Permeability
9. Coefficient of Permeability
10. Henry Darcy
11. Interinstic permeability
12. Constant head hydraulic conductivity test
13. Falling head hydraulic conductivity test

References

[1] Seyed Sadr, Seyed Abolghasem. Encyclopedia of Architecture and Urban Development, First Edition, Tehran: Azadeh Publication; 2002. [in Persian]

[صدر، سید ابوالقاسم . دایره المعارف معماری و شهرسازی، چاپ اول، تهران: آزاد؛ ۱۳۸۱.]

[2] Rafiee sereshki, B., Rafizadeh, N. & Ranjbar Kermani, A. Vocabulary of home spaces, holy culture Architecture Iran, Tehran: Markaz- e tahghighat- e sakhteman va maskan; 2004. [in Persian]

[رفیعی سرشکی، بیژن، رفیع‌زاده، ندا و رنجبر کرمانی، علی محمد. فرهنگ مهرازی (معماری) ایران، چاپ اول، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ ۱۳۸۳.]

[3] Sarmadnahri, A and Kardan, M. Complete reference for recognizing building materials, Third Editions Edition, Tehran: Motefakeran Publication; 2010. [in Persian]

[سرمدنهری، امیر و کاردان، محسن. مرجع کامل شناخت مصالح ساختمانی، چاپ سوم، تهران: متفکران؛ ۱۳۸۸.]

[4] Hajabbasi, M. A. Soil physical properties, First Edition, Isfahan: IsfahanUniversity of Technology

Publication; 2007. [in Persian]
[حاج عباسی، محمد علی. خصوصیات فیزیکی خاک، چاپ اول، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان؛ ۱۳۸۶.]

[5] Bater M, Ahmadi H, Emadi R. The Effect of Silicates Micronized Additives on Reduction of Permeability and Erosion due to Artificial Rainfall of Kahgel Plaster. JWSS. 2017; 21 (1) :199. [in Persian]
[باتر مسعود، احمدی حسین، عمادی رحمت اله. تأثیر افزودنی‌های میکرونیزه سیلیکاتی در کاهش نفوذپذیری و فرسایش ناشی از بارش مصنوعی اندود کاه‌گل. مجله علوم آب و خاک. ۱۳۹۶; ۲۱ (۱) :۱۹۹]

[6] Roy, Sangeeta, Chowdhury, Swaptik. "Earth as an Energy Efficient and Sustainable Building Material", International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS), 2013, 1(2), 248-252.

[7] Maheri, Mahmoud R., Maheri, Alireza, Pourfallah, Saeed, Azarm, Ramin, & Hadjipour, Akbar. Improving the Durability of Straw-Reinforced Clay Plaster Cladding for Earthen Buildings. International Journal of Architectural Heritage, 2011, 5(3), 349-366.

[8] Aflaki, E. Theory and Standards of Soil Mechanics, Third Editions, Tehran: JIHAD Amirkabir University Publication; 2011. [in Persian]
[افلاکی، اسماعیل. مبانی نظری و استانداردهای آزمایش‌های مکانیک خاک. چاپ اول. تهران: نشر جهاد دانشگاهی؛ ۱۳۸۹.]

[9] AL-Doury, M. 2010. A discussion about hydraulic permeability and permeability. Petroleum Sci. Technol, 2010, 28, 1740-1749.

[10] Seelheim, F. Method for the determination of permeability of the soil. Zeitschrift Fur Analytische Chemie, 1880, 19, 387-402.

[11] Scheidegger, A. E. The Physics of Flow through Porous Media. 3rd Ed. University Toronto Press. 1974.

[12] Chapuis, R. P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. Canadian Geotech. J, 2004, 41(5):787-795.,

[13] Bagarello, V. and M. Iovino. Field testing parameter sensitivity of the two-term infiltration equation using differentiated linearization. Vadose Zone J., 2002و ۲: ۳۵۸-۳۶۷.

[14] Mandal, U.K., A.K. Bhardwaj, D.N. Warrington, D. Goldstein, A. Bartal and Levy. G. J. Changes in soil hydraulic conductivity, runoff, and soil loss due to irrigation with different types of saline-sodic water. Geoderma, 2007, 144. 509-516.

[15] [15] Banihabib,, M., Iranpour, M. Effect of some soil physical and chemical properties on permeability in field conditions. Irrigation and Water Engineering, 2012; 2(4): 14-25. [in Persian]
[بنی حبیب, محمد ابراهیم, ایران پور, مهران. تأثیر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بر نفوذپذیری خاک در شرایط مزرعه‌ای .نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۲۵-۱۴: ۲(۴)؛ ۱۳۹۱.]

[16] Hwang, S., K.P. Lee, D.S. Lee and S.E. Powers. Models for estimating soil particle-size distributions. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, l66: 1143-1150.

[17] Lado, M., A. Paz and M. Ben-Hur. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68: 935-942.

[18] Lin H.S., K.J. McInnes, L.P. Wilding and C.T. Hallmark. Macroporosity and initial moisture effects on infiltration rates in vertisols and vertic intergrades. Soil Sci., 1998, 163 (1): 2-8.

[19] Oster, J.D. and I. Shainberg. Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. Aust. J. Soil Res., 2001, 39: 1219-1224.

[20] Halliwell, D.J., K.M. Barlow and D.M. Nash. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. Aust. J. Soil Res; 2001, 39: 1259-1267

[داس، براجا ام. اصول مهندسی ژئوتکنیک مکانیک خاک، چاپ اول. تهران: کتاب دانشگاهی؛ ۱۳۹۱.]

[28] Bater M, Ahmadi H, Abedi Koupai J, Emadi R. The Effect of Curing Time on Compressive and Tensile Strength of Traditional Kahgel. Journal of Housing and Rural Environment. 2017 Jun 10;36(157):69-86. [in Persian]

[باتر، مسعود؛ احمدی، حسین؛ عابدی کوپایی، جهانگیر و عمادی، رحمت اله. تأثیر مدت زمان عمل‌آوری ملات سنتی کاهگل بر مقاومت فشاری و کششی آن، مسکن و محیط روستا، ۱۳۹۶؛(۱۵۷)۳۶]

[29] Eftekhariyan, L; Titidezh, O; Mahinrosta, R; Khakbaz, B; Sarang, A; Navari, M; Sadeghiyan, P. Soil Mechanics Laboratory, Forth Editions, Tehran: Iran University press; 2012. [in Persian]

[افتخاریان، لیلا؛ تی تی دژ، امید؛ مهین روستا، رضا؛ خاکباز، بهناز؛ سارنگ، امین؛ نواری، مهدی و صادقیان،پدرام. آزمایشگاه مکانیک خاک، چاپ چهارم، تهران: نشر کتاب دانشگاهی؛ ۱۳۹۰]

[30] Aflaki, E. Soil Mechanics Laboratory, Ninth Editions, Tehran: Elm va Sanat 110, Publication; 2012. [in Persian]

[افلاکی، اسماعیل. آزمایشگاه مکانیک خاک. چاپ نهم. تهران: علم و صنعت ۱۱۰؛ ۱۳۹۰.]

[21] Davis, J.G., R.M. Waskom, T.A. Bauder and G.E. Cardon. Managing Sodic Soils Colorado State University, Cooperative Extension, 2005.

[22] Van Es, H.M., D.K. Cassel and R.B. Daniels. Infiltration variability and correlations with surface soil properties for an eroded hapludult. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 486-492.,

[23] Romkens, M.J., M. S.H. Luk, J.W.A. Poesen and A.R. Mermut. Rainfall infiltration into loess soils from different geographic regions. Catena, 1995, 25: 21-32.

[24] Hwang, S., K.P. Lee, D.S. Lee and S.E. Powers. Models for estimating soil particle-size distributions. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, l66: 1143-1150.

[25] Liu, Y., T.S. Steenhuis and Y. Parlange. Closed-form solution for finger width in sandy soils at different water contents. Water Reso. Res., 1994, (4): 949-952.

[26] Lin H.S., K.J. McInnes, L.P. Wilding and C.T. Hallmark. Macroporosity and initial moisture effects on infiltration rates in vertisols and vertic intergrades. Soil Sci., 1998, 163 (1): 2-8.

[27] Das, B.M. Principles of Geotechnical Engineering, Seventh Editions, Tehran: Iran University press; 2013. [in Persian]