نشریه علمی

پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران

سال چهارم، جلد 4، شماره 1، بهار و تابستان 1396 صص 1 الی 17

تاریخ دریافت مقاله: 1395/2/19

تاریخ تصویب مقاله: 1395/09/20

پایگاه نشریه: http://jerce.sru.ac.ir

بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل با استفاده از بنتونیت و کائولن میکرونیزه

مسعود باتر[1*]، جهانگیر عابدی کوپایی[2]، حسین احمدی[3] و رحمت‌اله عمادی[4]

[1] **استادیار**، گروه مرمت آثار تاریخی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه زابل

[2] **استاد**، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[3] **دانشیار**، گروه مرمت آثار تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان

[4] **استاد**، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

masoud.bater@zau.ac.ir

چکیده: کاهگل یکی از قدیمی‌ترین ملات‌های سنتی ایران است که قابلیت‌ها و تجربیات استفاده از آن در طول تاریخ، نشان‌دهنده آن است که می‌توان از آن، به عنوان یک پوشش مناسب برای حفاظت ساختارهای معماری خاکی استفاده نمود ولی لزوم تجدید دائمی آن، پس از هر بار فرسایش در مقابل بارندگی، حکایت از ناپایداری آن در مقابل رطوبت دارد؛ بنابراین یافتن روشهای علمی مناسب به منظور افزایش دوام و طول عمر مفید اندود کاهگل، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. بررسی تاثیر بنتونیت و کائولن میکرونیزه در ترکیب با ملات کاهگل به منظور افزایش دوام آن، نشان داد که با استفاده از کائولن تا 82 درصد و با بنتونیت تا 121 درصد می‌توان ضریب نفوذپذیری کاهگل را کاهش داد. به علاوه، کائولن و بنتونیت میکرونیزه، مقاومت فشاری کاهگل را نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب تا 39 و 33 درصد ارتقا می‌دهد. ارزیابی میزان دوام نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارش مصنوعی با دستگاه شبیه‌ساز باران نشان داد که استفاده از 3 درصد وزنی کائولن میکرونیزه، میزان هدر رفت ماده جامد نمونه‌ها را حداقل تا 16.7 درصد و حداکثر تا 31.4 درصد کاهش و دوام آنها را در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی افزایش می‌دهد. این مطالعات همچنین بیانگر آن است که با کاهش اندازه ذرات ماده افزودنی، میزان تاثیر مثبت آنها نیز در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کاهگل، مواد افزودنی میکرونیزه، بنتونیت، کائولن، حفاظت

Improvement of Insulation Properties of Thatch Mortar Using Micronized Kaolin and Bentonite

M. Bater, J. Abedi Koupai, H. Ahmadi and R. Emadi

Abstract: Thatch is one of the oldest traditional mortars in Iran, which it's capability and performance still is in controversial in conserving the earthen buildings throughout the history to conserve earthen buildings. It is used as a cover for conservation the earthen architectural structures, but its low durability and the need for renewal of the plaster due to erosional process and rainfall, the thatch mortar is weak in strength and unstable. Therefore, an essential and scientific method is needed to enhance the durability and lifetime duration of thatch mortar. The micronized kaolin and bentonite as additives are used to prepare different samples of thatch mortar in order to determine the mechanical strength performance and durability indices of the mortar. The results show that micronized kaolin reduces the saturated hydraulic conductivity of the mortar to 82 % level and micronized bentonite decreased to 121%. In addition, the micronized kaolin and bentonite increased the uniaxial compressive strength of the mortar up to 39% and 33%, respectively. Water erosion of samples during artificial rainfall was evaluated by simulator, showing that adding 3 wt. % of kaolin causes a minimum of 16.7% and a maximum of 31.4% in total dry material loss of weight in thatch mortar, leading to improve its durability against water erosion. The reason for improvement the prepared sample strength may be related to the increased surface area of materials.

Keywords: Thatch, Micronized Additives, Bentonite, Kaolin, Conservation.

1- مقدمه

تقریبا در تمام اقلیمهای گرم و خشک و معتدل جهان خاک رایج‌ترین مصالح ساختمانی است [1]، به طوری که خاک و مصالح خاکی، متداول‌ترین و مرسومترین مصالح ساختمانی حدود 40 درصد از جمعیت جهان محسوب می‌شود[2]. این سنت دیرپا، تداوم شگفت انگیزی نیز داشته است؛ به طوری که برآورد می‌شود، حدود 30 درصد از جمعیت جهان؛ یعنی تقریبا 1.7-1.5 میلیارد نفر در خانه‌های ساخته شده از مصالح خشت و گلی زندگی می-کنند [3-8، 1].

بر طبق آخرین آمار منتشر شده از سوی موسسه کراتره[1]، مرکز بین المللی معماری خاکی در گرانوبل[2] فرانسه، امروزه حدود 2 میلیارد نفر که در 150 کشور جهان پراکنده‌اند در خانه‌های ساخته شده از مصالح خاکی ساکن هستند [9]. در ایران نیز بر طبق سرشماری نفوس و مسکن سال 2012، از 19954114 واحد مسکونی کل کشور، 1051984 واحد از خشت و گل ساخته شده است که 5.27 درصد کل آمار واحدهای مسکونی ایران را شامل می‌شود. بر طبق این آمار، از کل واحدهای مسکونی خشت و گلی موجود، 71.42 درصد آن در نقاط روستایی و 28.57 درصد آن در نقاط شهری ساخته شده است [10].

در گذشته، ملات‌های خاکی، از قدیمی‌ترین و مهمترین ملات‌های مورد استفاده در معماری سنتی ایران بوده است. کاهگل یکی از قدیمی‌ترین مصالح خاکی و ملات‌های گلی است که در بسیاری از بناهای تاریخی و محوطه‌های باستانی ایران که جزء نخستین سکونتگاه‌های بشر بوده به‌کار رفته است. در ایران نیز استفاده از اندود کاهگل، یکی از ویژگی ها و مشخصات مهم میراث معماری خاکی در مناطق گرم و خشک محسوب می‌شود و بخش جدایی‌ناپذیری از هویت معماری بسیاری از بناهای تاریخی شهری و روستایی کشور ما است که از مخلوط نمودن خاکی با درصد بالایی از رس، با مقدار کمی الیاف کاه برای جلوگیری از ترک‌خوردن آن و ترکیب این مخلوط با آب تهیه می‌شود. این اندود ساده باستانی، نقش مهمی در حفظ ساختمان‌های خشت و گلی در مقابل بارندگی، در این مناطق به عهده داشته است. علاوه بر این، استفاده از یک لایه اندود کاهگل به ضخامت 5-3 سانتیمتر در سطح خارجی بنا، خاصیت عایق حرارتی نیز دارد [11].

از گذشته‌های دور، کاهگل، به عنوان یک پوشش حفاظتی، برای پوشش سطوح خارجی بنا و نیز عایق‌بندی پشت بام در مقابل رطوبت و بارندگی به‌کار می‌رفته است. با وجود کارایی و رواج گسترده ملات کاهگل در ابنیه سنتی و تاریخی، این اندود معایب بسیاری نیز دارد که موجب شده، استفاده از آن به تدریج در معماری دوران معاصر، تقریبا منسوخ شده و بکارگیری آن به عنوان یک پوشش حفاظتی برای محافظت میراث معماری خاکی نیز، با مشکلاتی همراه باشد. مهمترین معایب اندود کاهگل، عبارت است از: دوام و طول عمر کم، مقاومت و استحکام پایین در مقابل فرسایش، چسبندگی کم، ضعف شدید و وارفتگی در مقابل رطوبت و آب‌شستگی، ضعف در مقابل تهاجم عوامل بیولوژیک از جمله موریانه و انقباض بالا و ترک‌خوردگی شدید آن پس از خشک شدن.

با وجود معایبی که برای اندود کاهگل برشمردیم، به دلیل سازگاری خوب این ملات سنتی با ساختار بناهای خشت و گلی، هنوز هم اندود کاهگل در حفاظت بسیاری از بناها و محوطه‌های باستانی خشتی کاربرد دارد. در واقع، عایق‌بندی بدنه بنا با استفاده از این اندود برای حفاظت بنا، در مقابل رطوبت و بارندگی، اهمیت بسزایی دارد، چون بدین ترتیب، ساختارهای خشتی بنا از آسیب ناشی از عوامل محیطی، به ویژه بارندگی مصون مانده و محافظت می‌شوند؛ اما چون اندود کاهگل خود، به طور دائم، در معرض رطوبت و عوامل مخل محیطی است، به تدریج فرسایش یافته و قابلیت عایق‌بندی و حفاظتی خود را از دست می‌دهد، به همین خاطر، معمولا، بعد از 2-1 سال، بایستی این اندود تجدید شود؛ چون، این اندود، یک پوشش حفاظتی فدا شونده است که برای محافظت از ساختار اصلی ارزشمند بنا که حساس، ضعیف و آسیب‌پذیر است، به‌کار می‌رود.

قابلیت‌های نهفته موجود در اندود کاهگل و تجربیات استفاده از آن در حفاظت بناهای تاریخی خشتی نشان می‌دهد که می‌توان از آن، به عنوان یک پوشش مناسب برای حفاظت ساختارهای معماری خشت و گلی استفاده نمود ولی لزوم تجدید دائمی این اندود، پس از هر بار

فرسایش در مقابل عوامل آسیب‌رسان، به ویژه رطوبت و بارندگی، حکایت از ناپایداری و مقاومت پایین آن در مقابل رطوبت دارد. از سوی دیگر، پژوهش‌های انجام شده در مورد بهبود خواص و تثبیت خاک، حاکی از آن است که با استفاده از برخی از مواد افزودنی خاص معدنی می‌توان، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و مصالح خاکی، همچون کاهگل را بهبود و و ارتقاء بخشید؛ بنابراین با توجه به لزوم تجدید دائمی اندود کاهگل بدنه ابنیه تاریخی خشت و گلی، پس از فرسایش آنها و ضرورت استفاده از یک پوشش مناسب، کارآمد، مقرون به صرفه، سازگار با محیط زیست و ساختار اصلی سازه خشتی، برای حفاظت آن در مقابل عوامل آسیب‌رسان محیطی، به ویژه رطوبت و بارندگی، مطالعه برای یافتن راه حل‌های علمی مناسب به منظور افزایش دوام و طول عمر مفید اندود کاهگل بسیار لازم و ضروری به نظر می رسد، بنابراین توجه به این ملات سنتی کهن و تلاش برای احیاء آن از اهمیت بسیاری برخوردار است.

مطالعات آزمایشگاهی نوانکوار در آفریقا، گویای آن است که افزودن ترکیبی از 30 درصد خاکستر پوسته برنج، 2.5 درصد سیمان و 2.5 درصد آهک به بلوک‌های گل فشرده، مقاومت فشاری و دوام آنها را در مقابل فرسایش آبی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است[12]. ماهری و همکارانش در تحقیقی نشان دادند که افزودن 10 درصد آهک شکفته به همراه 10 درصد پودر سنگ به اندود کاهگل ساخته شده با 2 درصد کاه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دوام اندود کاهگل را در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی به طور چشمگیری افزایش می‌دهد [11]. آلاوز رامیرز و همکارانش در تحقیقی دریافتند که با افزودن مخلوطی از 10 درصد آهک و 10 درصد خاکستر باگاس نیشکر به ترکیب خاک مورد استفاده در تهیه بلوک‌های گل فشرده، می‌توان خواص مکانیکی و دوام این بلوک‌ها را بطور قابل توجهی ارتقاء داد. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط آنان، نشان داد که افزودن خاکستر باگاس نیشکر همراه با آهک تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود مقاومت خمشی و مقاومت فشاری این مصالح خاکی دارد [13]. میکلیز و همکاران در سال 2013 میلادی با استفاده از ضایعات آلومینا و زباله حاصل از خاکستر ذغال سنگ و افزودن آن‌ها به ترکیب خشت‌های تهیه شده از خاک رس مارنی موفق به تولید خشتی با مقاومت فشاری و دوام بالا شدند [14]. استفاده از خاکستر بادی برای تثبیت خاک توسط تیرودی و همکارانش در سال 2013 نشان داد که این ماده افزودنی ضایعاتی، علاوه بر قابلیت تثبیت، ظرفیت باربری خاک را نیز ارتقاء می‌دهد [15]. تثبیت خاک با استفاده از ضایعات مختلف کشاورزی و صنعتی، شامل: خاکستر بادی ذغال سنگ، خاکستر پوسته برنج، خاکستر باگاس و خاکستر کاه برنج، توسط انیپم و کومار در سال 2013، نشان داد که استفاده از این مواد ضمن تثبیت خاک سبب ارتقاء چشمگیر ظرفیت باربری کالیفرنیای خاک می‌گردد [16]. المهلاوی و کندل در سال 2014 در مصر با تهیه خشت با رس مونتموریلونیتی و تثبیت آن با 30 درصد آهک و 15 درصد سیمان نشان دادند که قدرت و تاثیر سیمان در تثبیت خشت بیشتر از آهک است، چون هیدروکسید کلسیم تولید شده از هیدراتاسیون سیمان فعال‌تر از آهک هیدراته می‌باشد [17].

جورجیو و همکارانش در سال 2014 با استفاده از الیاف گیاه لوئی، موفق شدند، علاوه بر کنترل انقباض خاک و جلوگیری از ترک خوردن اندودهای گلی پس از خشک شدن، مقاومت فشاری و مقاومت کششی اندود را نیز افزایش دهند و بدین ترتیب موجب دوام بیشتر اندودهای گلی شوند [18]. پژوهش حجازی و همکارانش در سال 2015 بر روی تأثیر مواد افزودنی مختلف شامل: ماسه، گچ، آهک، پودر آجر و کاه بر مقاومت مکانیکی خشت ساخته شده از خاک اصفهان نشان داد که با استفاده از ماسه و گچ می‌توان مقاومت فشاری خشت را به طور قابل توجهی افزایش داد. این مطالعات، حاکی از آن است که بهترین مواد افزودنی برای بهبود مقاومت مکانیکی خشت، گچ یا ترکیب گچ و پودر آجر با خشت است [19].

مطالعات ژانگ و همکارانش در سال 2015 میلادی در مورد تاثیر استفاده از افزودنی‌های مختلف، از جمله: ماسه سنگ مخلوط با خاکستر بادی، شن و ماسه کوارتزی بر روی دوام و کارایی دوغاب‌های گلی مورد استفاده در حفاظت بناهای خشت و گلی نشان داد که استفاده از این مواد موجب کاهش انقباض دوغاب و افزایش تخلخل آن

می‌گردد، ضمن آن که مقاومت و دوام آنها را در مقابل فرسایش بهبود می‌بخشد [20]. بررسی تاثیر استفاده از بزاق مصنوعی موریانه[۷] و ذرات بامبو در تهیه خشت توسط کوریا و همکارانش در سال 2015 نشان داد که با این مواد افزودنی انقباض خطی، درصد جذب آب و میزان فرسایش آبی در خشت کاهش یافته و افزودن 6 درصد ذرات بامبو به خشت مقاومت فشاری آن را تا 90 درصد ارتقاء می‌دهد [21]. بررسی تاثیر استفاده از الیاف کنف در ترکیب خشت توسط کالاتان و همکارانش بیانگر آن بود که استفاده از الیاف گیاهی کنف به میزان بهینه 10-9 درصد در ترکیب با خشت ضمن کنترل انقباض، جلوگیری از ترک خوردن آن و قابلیت حرارتی مناسب، موجب افزایش استحکام، مقاومت فشاری و خمشی خشت می‌شود [22].

جمع‌بندی پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه تثبیت خاک و مصالح خاکی و بهبود خواص آن‌ها، حاکی از آن است که بیشتر پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، بر روی بهینه‌سازی و اصلاح مصالح باربر مورد استفاده در ساخت و ساز و مرمت معماری خاکی، همچون: خشت و بلوکهای گلی بوده که بخش اعظم این تحقیقات، با هدف ارتقاء و افزایش مقاومت مکانیکی و توانبخشی این مصالح انجام شده است ولی به بهبود خواص و بهینه-سازی اندودهای گلی و نقش حفاظتی آن‌ها در بناهای تاریخی خشت و گلی، کمتر توجه شده است.

علاوه بر این، با وجود آن که اصلی‌ترین و مهمترین نقش و عملکرد کلیدی اندود کاهگل چه در گذشته، در معماری سنتی و بناهای تاریخی خشت و گلی و چه امروزه در حفاظت و مرمت این آثار، عایق‌بندی و حفاظت آن‌ها در مقابل فرسایش ناشی از رطوبت و بارندگی بوده است ولی تا کنون پژوهشی اختصاصی و جامع در این زمینه، به منظور بهبود و ارتقاء خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل برای استفاده از آن به عنوان یک پوشش حفاظتی کارآمد و بادوام در بناهای تاریخی انجام نشده است.

از سوی دیگر بررسی پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، گویای آن است که در تمامی آن‌ها، به ویژه مطالعاتی که در زمینه تثبیت و بهبود خواص مصالح خاکی به منظور بکارگیری آن‌ها در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی خشت و گلی انجام شده است، اغلب، تاثیر نوع ماده افزودنی و میزان استفاده از آن، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است و آنچه که در این میان به فراموشی سپرده شده و مورد غفلت قرار گرفته است، اهمیت فوق العاده ابعاد و اندازه ذرات ماده افزودنی به‌کار رفته در بهبود خواص مصالح خاکی مورد استفاده در حفاظت و مرمت آثار تاریخی خشت و گلی است، بطوری که کمتر پژوهشی را می‌توان یافت که نقش ابعاد ذرات ماده افزودنی را در ارتقاء خواص مصالح خاکی در آن، مد نظر قرار گرفته باشد.

لزوم تجدید دائمی اندود کاهگل به دلیل دوام کم و مقاومت پایین آن در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی، سبب شده است که برای کنترل و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری بنا به تدریج عایق‌های دیگر، جایگزین کاهگل شود. بدیهی است که با بهبود خاصیت عایق‌بندی کاهگل در مقابل رطوبت، میزان فرسایش آن نیز در برابر بارندگی کاهش می‌یابد که نتیجه آن افزایش دوام و ماندگاری هر چه بیشتر اندود کاهگل است. از سوی دیگر، با افزایش دوام کاهگل، طول عمر مفید حفاظت انجام شده با آن نیز افزایش یافته و به دنبال آن، هزینه‌های سالیانه حفاظت، مرمت و نگهداری از میراث معماری خاکی نیز کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، ضمن جلوگیری از به‌هدر رفتن سرمایه ملی، در طی عملیات حفاظت و مرمت اثر نیز، فاصله زمانی لازم، برای تجدید دوباره اندود کاهگل به تبع افزایش دوام و ماندگاری آن، طولانی‌تر خواهد شد. بدیهی است که در صورت نیل به این هدف، ضمن صرفه‌جویی در وقت و بودجه مرمت، آسیب‌های احتمالی ناشی از تکرار عملیات حفاظت نیز به طور چشمگیری کاهش خواهد یافت. در واقع، دستاورد تمامی این تلاش‌ها، حرکت در راستای نیل به یکی از مهمترین اصول مبانی نظری مرمت است؛ یعنی دخالت کمتر و ماندگاری و طول عمر هرچه بیشتر اثر.

2- مواد و روش‌ها

این پژوهش تجربی با مطالعات آزمایشگاهی بر روی ملات کاهگل به منظور بهبود خاصیت عایق‌بندی آن با

استفاده از بنتونیت و کائولن میکرونیزه انجام شد. پس از تهیه خاک مناسب از منطقه جنوب اصفهان، نمونه-های آزمایشی مختلفی از اندود کاهگل با افزودن درصدهای مختلف الیاف کاه ساخته شد و پس از خشک شدن نمونه‌ها، مقاومت فشاری، درصد انقباض خطی و تعداد ترک‌های سطحی آنها به روش استاندارد تعیین گردید و سپس با بررسی نتایج حاصل از این آزمایشات، مناسب‌ترین نمونه کاهگل از نظر ترکیب میزان الیاف کاه با خاک به عنوان گروه آزمایشی شاهد و کنترل برای انجام پژوهش برگزیده شد. در مرحله بعد، نخست، خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های ملات کاهگل گروه آزمایشی شاهد و کنترل (نمونه‌های کاهگل عادی بدون ماده افزودنی) مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت و بعد تاثیر بکارگیری مواد افزودنی میکرونیزه با دانه‌بندی متفاوت بر روی همان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در نمونه‌های ملات کاهگل جدید تهیه شده با مواد افزودنی اندازه‌گیری شد و سپس نتایج حاصل با نمونه‌های ملات کاهگل کنترل مقایسه گردید.

در تمام مراحل تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، ترکیب اندود کاهگل مورد آزمایش از نظر، نوع خاک، بافت خاک، نوع الیاف، درصد الیاف کاه، نحوه تهیه، روش عمل‌آوری و مدت زمان عمل‌آوری، ثابت در نظر گرفته شد و تنها نوع و ابعاد ذرات مواد افزودنی میکرونیزه مورد استفاده برای بهبود خاصیت عایق‌بندی ملات کاهگل به عنوان متغیر مستقل تحقیق، در این پژوهش متفاوت بود. پس از تهیه ملات کاهگل با توجه به شرایط فوق، برای عمل‌آوری مناسب آن، ملات کاملا با همزن برقی مخلوط شده و سپس به مدت 72 ساعت، تحت رطوبت در زیر لایه‌ای از پلاستیک نگهدای شد و بعد نمونه‌های آزمایشگاهی مورد نظر، مطابق با جدول 1 برای تعیین خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، شامل: مقاومت فشاری، انقباض خطی و ضریب نفوذپذیری به شرح زیر از ملات مورد نظر تهیه گردید.

در طی انجام این پژوهش، گروه تحقیقاتی با مشکلات و موانع بسیاری روبرو بود که مهمترین آنها، عدم دسترسی به روش‌های آزمایشگاهی استاندارد برای ارزیابی و سنجش ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد و مصالح خاکی، به ویژه خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل بود. این معضل زمانی بیشتر بروز و نمود یافت که در انجام مطالعات آزمایشگاهی، استفاده از استانداردهای بین‌المللی برای انجام آزمون‌های عملی به عنوان معیار انتخاب شد، زیرا در استانداردهای بین المللی، روش‌های آزمایشگاهی مخصوصی برای مواد و مصالح خاکی که با ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاص این دسته از مصالح، تناسب و همخوانی داشته باشد، کمتر یافت می‌شود.

جدول 1. روش‌های مطالعه آزمایشگاهی و کد استاندارد روش آزمایش نمونه‌های کاهگل

Table 1. Laboratorymethods and standard cods of experimental studies of Kahgel plaster

Test	Standard	Method	Shape of Samples and dimensions
Compression strength	ASTM C109-90	The axial compressive strength	Cube Specimens, 10×10×10 cm
Linear shrinkage	BS 1377-Part 2	molds and oven - dried	Semi-cylinder Specimens, length 14 cm
Hydraulic conductivity	ASTM D2434-68	Falling Head Hydraulic Conductivity Test	Cylindrical Specimens, height 3.5 cm and diameter 5 cm
Durability		water erosion of the samples by rainfall simulator	Cube Specimens, 10×10×3 cm

بنابراین برای این منظور از روش‌های آزمایشگاهی استاندارد مرسوم برای ارزیابی مصالح ساختمانی مشابه برای سنجش خواص فیزیکی و مکانیکی مواد و مصالح خاکی، از جمله اندود کاهگل استفاده شد، چون یکی از اهداف فرعی این تحقیق، تلاش برای یافتن روشهای آزمایشگاهی استاندارد برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی به ویژه اندود سنتی کاهگل بود، از این رو در درون این پژوهش، تحقیق دیگری نیز برای یافتن و ارزیابی روش‌های استاندارد مناسب برای مطالعه آزمایشگاهی مواد و مصالح خاکی نهفته است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

2-1- خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های ملات کاهگل آزمایشگاهی از منطقه دشت مهیار در جنوب اصفهان تهیه شد و سپس ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و

مکانیکی آن، شامل: درصد مواد آلی، درصد رطوبت، دانه‌بندی (شکل 1)، حدود اتربرگ، چگالی ویژه، pH، هدایت الکتریکی و درصد انقباض خطی آن، مطابق با استانداردهای بین‌المللی به شرح مندرج در جدول 2، مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفت که نتایج آن طبق آزمایشات انجام شده بدین شرح می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی نمونه خاک انتخابی از دشت مهیار اصفهان، حاکی از آن است که این خاک از نظر بافت جزء خاک‌های ماسه‌ای رس دار طبقه‌بندی می‌شود (جدول 3).

جدول 2. نتایج آزمایش های ژئوتکنیک و شیمیایی خاک مهیار اصفهان

Table 2. Results of geotechnical and chemical tests on soil of Mahyar-Isfahan

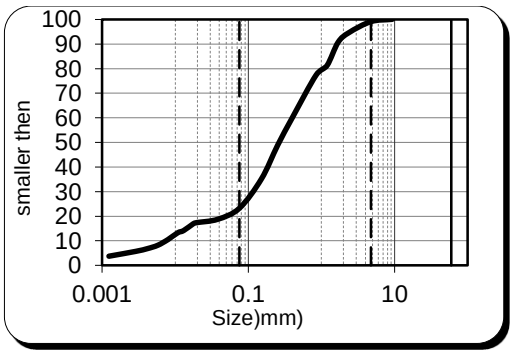
Test	Standard	Resul
Liquid limit (%)	ASTM D4318-98	21.5
Plastic limit (%)	ASTM D4318-98	12.2
Plastic index (%)	ASTM D4318-98	9.3
Grain Size Analysis	ASTM D422-87	Table 3
Determination of Water (Moisture) Content of Soil(%)	ASTM D4643-00	2.34
Specific gravity of soil solids (g/cm^3)	ASTM D854-02	2.69
Linear Shrinkage of the soil (%)	BS 1377- Part 2	6.09
pH of Soil	ASTM D4972	7.81
Organic content(%)	ASTM D2974	1.71
electrical conductivity of soil (EC)(mS/cm)	ASTM D4972	1.13

جدول 3. نتایج آزمایش دانه‌بندی نمونه خاک دشت مهیار اصفهان

Table 3. grading result for soil sample of Mahyar Plain in Isfahan

0.92	Percent of gravel
80.44	Percent of sand
18.65	Percent of silt
4.63	Percent of clay
0.007	D_{10}
0.111	D_{30}
0.397	D_{60}
4.25	Cc
54.21	C_U
A-2-4(0)	Grading based on
SC- Clayey Sand	Grading based on USCS

تعیین حدود اتربرگ این نمونه خاک نشان می‌دهد که با توجه به پایین بودن دامنه خمیری آن، این خاک کمتر دچار ترک می‌شود؛ علاوه بر این، این داده‌ها با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری درصد انقباض خطی خاک نیز به خوبی مطابقت دارد. با توجه به اهمیت میزان انقباض نمونه خاک پس از خشک شدن، روشن است که هرچه درصد انقباض خاک کمتر باشد، میزان ترکها و ریزترک‌های ایجاد شده در سطح ملات تهیه شده از خاک نیز به همان نسبت کاهش می‌یابد که از این نظر نیز خاک مهیار نمونه خاک مناسبی برای تهیه مصالح خاکی محسوب می‌شود. اندازه‌گیری درصد مواد آلی خاک، نشان‌دهنده آن است که میزان مواد آلی این خاک بسیار اندک است که این ویژگی نیز این خاک را برای تهیه مصالح خاکی متمایز و مناسب می‌گرداند.



شکل 1. نمودار دانه‌بندی نمونه خاک انتخابی از دشت مهیار اصفهان

Fig. 1. Gradation curves for soil of Mahyar Isfahan

میزان هدایت الکتریکی این خاک نسبتا پایین است که میزان آن در خاک، با مقدار نمک‌های محلول خاک، ارتباط مستقیم دارد و حاکی از میزان شوری خاک است، روشن است که هرچه میزان هدایت الکتریکی خاکی کمتر باشد با توجه به پایین‌تر بودن درصد نمک‌های محلول آن، برای تهیه مصالح خاکی مناسب‌تر است. بنابراین با توجه به مجموع نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی این نمونه خاک، به نظر می‌رسد که خاک تهیه شده از دشت مهیار به دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مطلوب برای تهیه ملات کاهگل مناسب می‌باشد.

2-2- مواد افزودنی

برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل بـه ویـژه خاصیت عایق‌بندی آن که مهمترین ویژگی این ملات و اندود سنتی در بناهای خشت و گلی محسوب می‌شود از بنتونیت و کائولن میکرونیزه در ابعاد 150 و 45 میکرون استفاده شد.

3- نتایج و بحث

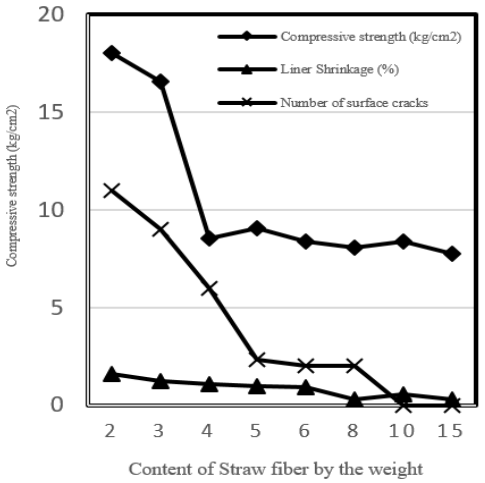
3-1- تعیین ترکیب بهینه ملات کاهگل با آزمایش

با توجه به اهمیت درصد الیاف کاه موجود در ترکیب ملات کاهگل و تاثیر آن بر خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی ملات، برای دستیابی به درصد بهینه کاه در ترکیب کاهگل، پس از انتخاب خاک مناسب، نمونه-های مختلفی از این ملات با درصدهای مختلف کاه گندم تهیه شد و سپس با استفاده از قالب‌های آزمایشگاهی استاندارد، برای هر آزمون، 3 نمونه آزمایشگاهی از ملات کاهگل به شرح زیر تهیه گردید: نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد 3×10×10 سانتیمتر برای بررسی وضع ظاهری و میزان ترک‌های سطحی ملات؛ نمونه‌های نیم‌استوانه‌ای استاندارد به طول 14 سانتیمتر برای اندازه‌گیری درصد انقباض خطی ملات و نمونه‌های مکعبی به ابعاد 5×5×5 سانتیمتر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری. برای کنترل میزان تراکم و فشردگی ملات در داخل قالب-ها، هنگام قالب‌گیری، میزان تراکم آن‌ها با توزین و یکسان نمودن وزن ملات درون هر یک از قالب‌ها و استفاده از مقدار آب یکسان برای تهیه ملات در هریک از نسبت ترکیب‌های انتخابی، سعی شد تا شرایط آزمایشگاهی نمونه‌ها کنترل و همسان گردد.

برای خشک کردن تدریجی نمونه‌های ملات، با شرایط یکسان، به منظور جلوگیری از ترک خوردن آن‌ها در هنگام خشک شدن، ابتدا تمامی نمونه‌ها به مدت 72 ساعت در سایه، در محیط آزمایشگاه قرار داده شد، تا به آرامی رطوبت سطحی نمونه‌ها کاهش یافته و اندکی خشک شوند، سپس نمونه‌های کاهگل به مدت 24 ساعت در آون در دمای 65 درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا تقریبا خشک شوند و در مرحله پایانی برای خشک شدن کامل آن‌ها، 24 ساعت دیگر نمونه‌های کاهگل در آون با دمای 80 درجه سانتیگراد خشک گردید.

پس از خروج نمونه‌ها از قالب و توزین مجدد، تمامی آنها به مدت 14 روز در محیط آزمایشگاه نگهداری شد و پس از رسیدن سن نمونه‌ها به 14 روز، نمونه‌های تهیه شده مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه، شامل: تعیین مقاومت فشاری، تعیین درصد انقباض خطی و میانگین تعداد ترک‌های ایجاد شده در سطح نمونه‌ها به شرح مندرج در شکل 2 و جدول 4 می‌باشد:

بررسی نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه حاکی از آن است کـه بـا افزایش درصد الیاف کاه در ترکیب کاهگل، مقاومـت فشـاری نمونه‌ها نیز به دلیل کاهش ذرات خاک درگیـر بـا الیـاف بـه تدریج کاهش می‌یابد.



شکل 2. نتایج آزمایش نمونه‌های مختلف اندود کاهگل با درصدهای متفاوت الیاف کاه

Fig. 2. Results of geotechnical test of Kahgel plaster with different content of straw fiber

هنگامی که درصد الیاف کاه در ملات از 2 درصد وزنی به 4 درصد می‌رسد، افت شدیدی به میزان 52.71 درصد در مقاومت فشاری ملات کاهگل مشاهده می‌شود، بطوری که در نمودار مقاومت فشاری نسبت به درصد الیاف کاه نیز، مقاومت فشاری کاهگل با شیب بسیار تندی سقوط می‌نماید ولی در ادامه با افزایش درصد الیاف کاه در کاهگل، این کاهش، ادامه نیافته و پس از رسیدن درصد الیاف کاه به 4 درصد، میزان مقاومت فشاری ملات، تقریبا ثابت باقی می‌ماند و تنها زمانی که میزان الیاف کاه به 15 درصد افزایش می‌یابد، مجددا شاهد کاهش میزان مقاومت فشاری کاهگل هستیم.

جدول 4. نتایج مطالعه آزمایشگاهی ژئوتکنیک نمونه‌های مختلف اندود گاهگل تهیه شده با درصدهای متفاوت کاه

Table 4. Results of geotechnical testing of Kahgel plaster with different content of straw fiber

Kahgel Samples	Straw fiber by weight (%)	Compressive strength (kg/cm^2)	Liner Shrinkage (%)	Average number of surface cracks
CW2h	2	18.04	1.6	11
CW3h	3	16.56	1.25	9
CW4h	4	8.53	1	6
CW5h	5	9.05	0.95	2.3
CW6h	6	8.4	0.9	2
CW8h	8	8.06	0.3	2
CW10	10	8.4	0.55	0
CW15	15	7.75	0.3	0

اندازه‌گیری انقباض خطی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف الیاف کاه نشان داد که با افزایش درصد الیاف کاه در ملات کاهگل، میزان انقباض و به تبع آن میزان ترک‌خوردگی نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد، این یافته با کاهش تعداد ترک‌های سطحی ایجاد شده پس از خشک شدن نمونه‌های کاهگل نیز مطابقت دارد. به علاوه با افزایش درصد الیاف کاه در نمونه‌ها، وضعیت ظاهری آنها نیز تغییر می‌کند، به طوری که با افزایش درصد کاه میزان استحکام و انسجام نمونه‌ها کاهش و سطح آنها به تدریج صافی و یکدستی خود را به دلیل افزایش درصد الیاف ازدست داده و ناصاف و زمخت می‌گردد. با توجه به نتایج فوق به نظر می‌رسد که مناسب‌ترین میزان الیاف کاه برای تهیه ملات کاهگل با خاک انتخابی، تهیه کاهگل با 5 درصد وزنی الیاف کاه می‌باشد که در آن میزان مقاومت فشاری کاهگل در حد قابل‌قبولی است، ضمن آن که میزان انقباض و ترک خوردگی سطح نمونه‌ها نیز اندک است و علاوه بر این، کاهگل از انسجام و استحکام ظاهری خوبی برخوردار بوده و سطح صاف و یکدستی دارد (شکل 2 و جدول 4).

3-2- نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان نمونه‌های کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی

مهمترین نقش اندود سنتی کاهگل، نقش حفاظتی آن به عنوان عایق رطوبتی در معماری و بناهای تاریخی خشت و گلی است، به همین خاطر یکی از اهداف اصلی این پژوهش، بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل و به تبع آن افزایش دوام و ماندگاری این اندود سنتی در مقابل رطوبت و بارندگی بود؛ بنابراین ارزیابی خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل در حالت عادی به عنوان نمونه‌های شاهد و کنترل (نمونه‌های کاهگل بدون ماده افزودنی) و مقایسه نتایج با نمونه ملاتهای بهبود یافته با بنتونیت و کائولن میکرونیزه به منظور بررسی میزان تاثیرگذاری این مواد در بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل از اهمیت بسیاری برخوردار بود.

با توجه به اینکه خاصیت عایق‌بندی در مصالح، بعکس حالت نفوذپذیری است، بنابراین برای اندازه‌گیری این ویژگی مهم اندود کاهگل از آزمایش استاندارد تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان استفاده شد، چون خاک مورد استفاده برای تهیه ملات کاهگل ریزدانه بود. برای این کار، از هر ترکیب ملات

کاهگل، سه نمونه استوانه‌ای مجزا به ارتفاع حدود 3.5 سانتیمتر و قطر 5 سانتیمتر، با وزن و تراکم یکسان تهیه و در داخل سه دستگاه مجزای نفوذسنجی استاندارد قرار داده شد و سپس ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها پس از رسیدن آنها به حالت پایداری و تعادل در طول 72 ساعت پس از عمل آوری، حداقل 24 نوبت پی در پی اندازه‌گیری شد و بعد میانگین مجموع 72 نوبت اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها، به عنوان نتیجه نهایی برای تعیین ضریب نفوذپذیری نهایی نمونه کاهگل با بار افتان محاسبه گردید.

در این مرحله از آزمایشها، نخست ضریب نفوذپذیری نمونه کاهگل معمولی (کاهگل شاهد بدون ماده افزودنی)، تعیین گردید و سپس ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل جدید تهیه شده با استفاده از بنتونیت و کائولن میکرونیزه، به روش فوق اندازه‌گیری شد و در پایان، نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری کاهگل معمولی (نمونه شاهد) با نمونه‌های کاهگل جدید تهیه شده با مواد افزودنی با یکدیگر مقایسه گردید که نتایج حاصل به این شرح است:

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری ملات کاهگل تهیه شده با بنتونیت و کائولن میکرونیزه و مقایسه آن با نمونه‌های کنترل، بیانگر آن است که در مواد افزودنی انتخابی، تاثیر مثبتی در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل در مقابل نفوذ آب داشته است. همان طور که نتایج و نمودار اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها در جداول 8 تا 5 و نمودارهای ارائه شده در اشکال 4 تا 3 نشان می‌دهد، در میان این دوافزودنی، کائولن بیشترین تاثیر را در کاهش ضریب نفوذپذیری کاهگل داشته است، به طوری که تنها استفاده از این ماده افزودنی به میزان 3 درصد با دانه‌بندی 150 میکرون، ضریب نفوذپذیری ملات کاهگل را 65 درصد کاهش می‌دهد و با افزایش میزان ماده افزودنی به 6 درصد، شاهد یک کاهش 82 درصدی در ضریب نفوذپذیری کاهگل هستیم.

جدول 5. نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل با 3 درصد افزودنی 150 میکرون

Table 5. Results of hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives150 microns

micronized additives	hydraulic conductivity cm/s	Variation compared to the control
Bentonite	1.12×10-6	-6.66
kaolin	4.2×10-7	-65
Control samples of	1.2×10-6	

جدول 6- نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل با 6 درصدافزودنی 150 میکرون

Table 6. Results of hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives 150 microns

micronized additives	hydraulic conductivity cm/s	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 5
Bentonite	2.66×10-6	+121.66	+115
kaolin	2.14×10-7	-82.16	-17.16

جدول 7. نتایج تعیین ضریبن فوذپذیری نمونه‌های کاهگل با 3 درصدافزودنی 45 میکرون

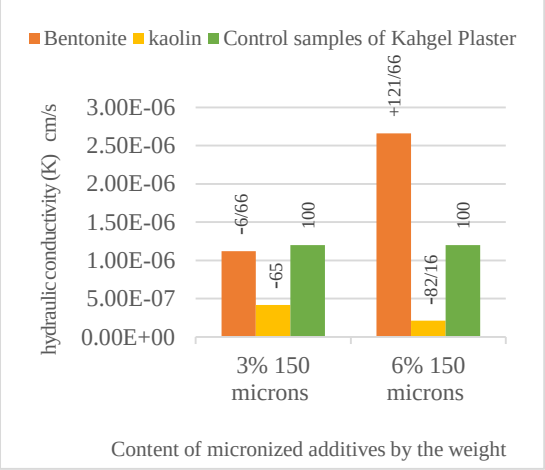
Table 7. Results of hydraulic of modified samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives45 microns

micronized additives	hydraulic conductivity cm/s	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 5
Bentonit	4.75×10-7	-60.41	-53.75
kaolin	3.47×10-7	-71.08	-6.08

جدول 8. نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل با 6 درصدافزودنی 45 میکرون

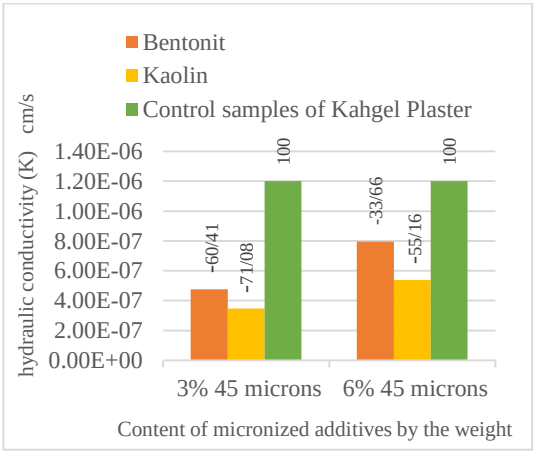
Table 8. Results of hydraulic of modified samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives45 microns

micronized additives	hydraulic conductivity cm/s	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 6
Bentonite	7.96×10-7	-33.66	+88
Kaolin	5.38×10-7	-55.16	+27



شکل 3. نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 150 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 3. Variation of hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with additives 150 microns



شکل 4. نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 45 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 4. Variation of hydraulic conductivity of modified samples of Kahgel plaster with additives 45 microns

استفاده از بنتونیت نیز همین تاثیر مثبت را در کاهش ضریب نفوذپذیری کاهگل به دنبال دارد، ضمن آن که با افزودن ۶ درصد از این افزودنی با دانه‌بندی 150 میکرون می‌توان به بالاترین میزان کاهش نفوذپذیری؛ یعنی 121 درصد دست یافت. علاوه بر این نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که با کاهش ابعاد ماده افزودنی از 150 میکرون به 45 میکرون، تاثیر مواد افزودنی فوق در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل افزایش می‌یابد. به طوری که در غلظت پایین 3 درصد، با کاهش اندازه دانه‌بندی در کائولن شاهد افزایش میزان کاهشی به میزان 6 درصد و در بنتونیت به میزان 53 درصد در ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل می‌باشیم.

3-3- نتایج آزمون مقاومت فشاری کاهگل

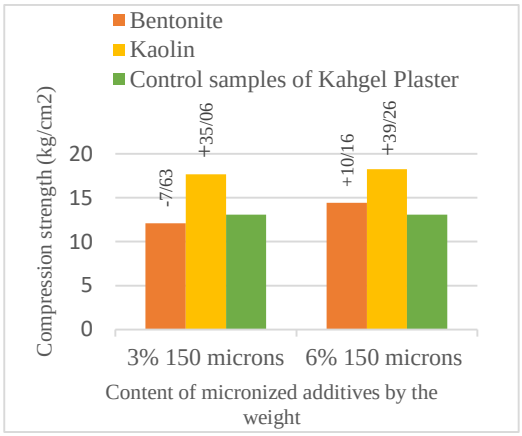
مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل، مطابق با روش استاندارد ASTM C109-90، با استفاده از جک هیدرولیک ملات‌شکن اندازه‌گیری شد. به این منظور، از هر نسبت ترکیب، 3 نمونه مکعبی برای آزمایش تهیه و پس از رسیدن به سن 14 روزه‌گی، مقاومت فشاری آن‌ها تعیین شد که نتایج آن به این شرح است: نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های ملات کاهگل بهسازی شده با بنتونیت و کائولن میکرونیزه و مقایسه آن با نمونه‌های ملات شاهد، حاکی از آن است که در میان مواد افزودنی این گروه، استفاده از 6 درصد وزنی کائولن با دانه‌بندی 150 میکرون با افزایشی 39 درصدی، بیشترین تاثیر مثبت را در افزایش مقاومت فشاری ملات کاهگل دارد و بنتونیت در رتبه بعدی قرار دارد.

از سوی دیگر بر خلاف کائولن که افزایش درصد و کاهش ابعاد و دانه‌بندی آن تاثیر چندانی در تغییر مقاومت فشاری نهایی ملات کاهگل ندارد، در بنتونیت با افزایش درصد ماده افزودنی از 3 به 6 درصد وزنی، شاهد افزایشی 10 درصدی در میزان مقاومت فشاری ملات کاهگل هستیم و علاوه بر این با کوچک شدن دانه‌بندی پودر بنتونیت از 150 میکرون به 45 میکرون، مقاومت فشاری ملات حاصل، 23 درصد افزایش می‌یابد و با افزایش میزان بنتونیت 45 میکرون مصرفی از 3 به 6 درصد، افزایش مقاومت فشاری ملات کاهگل همچنان ادامه یافته و به حدود 34 درصد می‌رسد و نسبت به نمونه ملات بهبود یافته با همین میزان بنتونیت 150 میکرون افزایشی 23 درصدی را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به مجوع نتایج به نظر می‌رسد که با کوچک شدن ابعاد ماده افزودنی و کاهش دانه‌بندی آن از 150 میکرون به 45 میکرون، میزان تاثیر مواد افزودنی در بهبود مقاومت فشاری کاهگل افزایش می‌یابد (جداول 12-9 و اشکال 6-5).

جدول 9. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل با 3 درصد افزودنی 150 میکرون

Table 9. Results ofcompression strength of improved samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives150 microns

micronized additives	Compression strength (kg/cm2)	Variation compared to the control samples (%)
Bentonite	12.09	-7.63
kaolin	17.68	+35.06
Control samples of Kahgel Plaster	13.09	



شکل 5. نمودار تغییرات مقاومت فشاری کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 150 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 5. Variation of compression strength of improved samples of Kahgel plaster with additives 150 microns

جدول 10. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل با 6 درصد افزودنی 150 میکرون

Table 10. Results of compression strength of improved samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives150 microns

micronized additives	Compression strength (kg/cm2)	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 9
Bentonite	14.42	+10.16	+17.79
kaolin	18.23	+39.26	+4.2

جدول 11. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل با 3 درصد افزودنی 45 میکرون

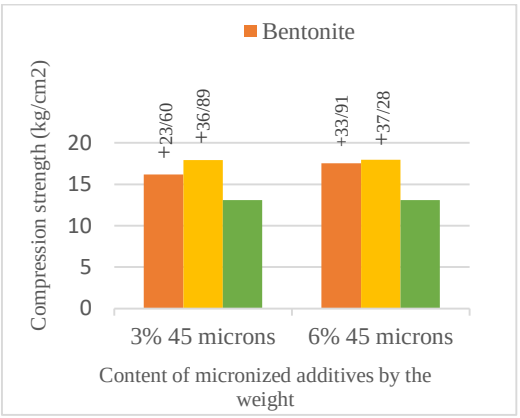
Table 11. Results ofcompression strength of improved samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives45 microns

micronized additives	Compression strength (kg/cm2)	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 9
Bentonite	16.18	+23.60	+31.23
kaolin	17.92	+36.89	+1.83

جدول 12. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل با 6 درصد افزودنی 45 میکرون

Table 12. Results ofcompression strength of improved samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives45 microns

micronized additives	Compression strength (kg/cm2)	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 10
Bentonite	17.53	+33.91	+23.75
kaolin	17.97	+37.28	-1.98



شکل 6. نمودار تغییرات مقاومت فشاری کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 45 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 6. Variation of compression strength of improved samples of Kahgel plaster with additives 45 microns

4-3- نتایج اندازه‌گیری درصد انقباض خطی کاهگل

بیشتر ملات‌های گلی، نظیر ملات کاهگل که در معماری و حفاظت و مرمت بناهای تاریخی خشت و گلی کاربرد دارند، پس از خشک شدن به دلیل انقباض و کاهش حجم بسیار ناشی از تبخیر رطوبت در هنگام خشک شدن به شدت دچار ترک‌خوردگی می‌شوند. ایجاد این ترک‌ها و ریزترک‌ها در سطح کاهگل پس از خشک شدن آن، این اندود سنتی را به شدت در مقابل خسارت و فرسایش ناشی از رطوبت و بارندگی آسیب‌پذیر می‌نماید؛ از این رو هرچه میزان انقباض نمونه ملات گلی پس از خشک شدن کمتر باشد به همان نسبت میزان ترک خوردگی ملات نیز کاهش یافته و به تبع

آن میزان دوام و ماندگاری ملات در مقابل عوامل فرساینده محیطی، به ویژه رطوبت و بارندگی افزون‌تر خواهد شد.

در این پژوهش، برای تعیین میزان انقباض ملات کاهگل بعد از خشک شدن، از آزمون اندازه‌گیری درصد انقباض خطی خاک، طبق استاندارد BS 1377- Part 2 با استفاده از قالب و آون استفاده شد. برای این کار از هر کدام از نمونه‌های ملات کاهگل آماده شده، 3 نمونه نیم‌استوانه‌ای از طریق قالب‌گیری با قالب استاندارد مهیا گردید و سپس این نمونه‌ها نیز همچون سایر نمونه‌های آزمایشگاهی به آرامی در محیط آزمایشگاه و آون خشک شد و بعد میزان کاهش طول نمونه‌ها با کولیس و با دقت 0.01 میلیمتر اندازه‌گیری و درصد انقباض خطی آنها، طبق دستوالعمل آزمایش، محاسبه گردید و آن‌گاه میانگین درصد انقباض خطی سه نمونه آزمایشگاهی در هر نمونه ملات کاهگل، تعیین و نتایج حاصل با نمونه کاهگل شاهد و کنترل مقایسه شد که نتایج آن به شرح زیر است:

بررسی نتایج برآمده از اندازه‌گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های مختلف ملات کاهگل تهیه شده با استفاده از بنتونیت و کائولن میکرونیزه و مقایسه نتایج با نمونه ملات شاهد، نشان‌دهنده آن است که استفاده از این مواد افزودنی به میزان کم با دانه‌بندی 150 میکرون می‌تواند تا حدی میزان انقباض خطی ملات کاهگل و ترک خوردگی ناشی از آن را پس از خشک شدن کاهش دهد. نتایج این آزمون حاکی از آن است که استفاده از 3 درصد وزنی، بنتونیت تا 12 درصد، میزان انقباض خطی ملات کاهگل را پس از خشک شدن کاهش می‌دهد ولی با افزایش میزان ماده افزودنی بنتونیت و کائولن 150 میکرون به 6 درصد وزنی، انقباض خطی ملات کاهگل، حدود 22 درصد افزایش یافته و با کم کردن درصد ماده افزودنی به 3 درصد و کاهش ابعاد و دانه‌بندی افزودنی به 45 میکرون، روند افزایش درصد انقباض خطی کاهگل تقریبا به همان نسبتی که مواد افزودنی به میزان 6 درصد و با دانه‌بندی 150 میکرون استفاده شده بود افزایش می‌یابد. از سوی دیگر نتایج حاصل از بکارگیری افزودنی بنتونیت و کائولن 45 میکرون به میزان 3 و 6 درصد در ملات کاهگل حاکی از آن است که تاثیر بنتونیت در افزایش انقباض خطی ملات، تقریبا 2 برابر کائولن است (جداول 16-13 و اشکال 8-7) که احتمالا ناشی از قابلیت تورم و جذب آب بالای بنتونیت است.

جدول 13. نتایج اندازه گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل با 3 درصد افزودنی 150 میکرون

Table 13. Results of linear shrinkage of modified samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives150 microns

micronized additives	Percent of liner shrinkage	Variation compared to the control samples (%)
Bentonite	2.18	-12.44
kaolin	2.53	+1.60
Control samples of Kahgel Plaster	2.49	

جدول 14. نتایج اندازه گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل با 6 درصد افزودنی 150 میکرون

Table 14. Results of linear shrinkage of modified samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives150 microns

micronized additives	Percent of liner shrinkage	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 13
Bentonite	3.066	+23.13	+35.57
kaolin	3.033	+21.80	+20.2

جدول 15. نتایج اندازه‌گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل با 3 درصد افزودنی 45 میکرون

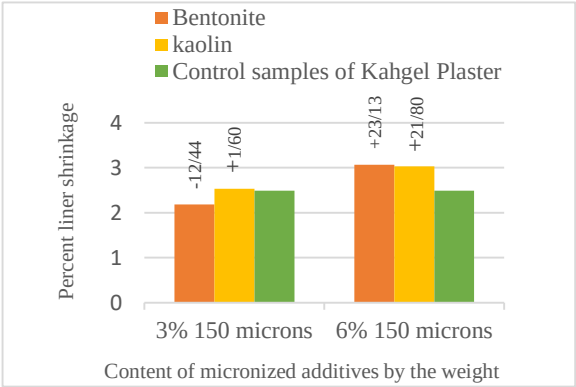
Table 15. Results of linear shrinkage of modified samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives 45 microns

micronized additives	Percent of liner shrinkage	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 13
Bentonite	3.2	+28.51	+40.95
kaolin	3.073	+23.41	+21.81

جدول 16. نتایج اندازه‌گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل با 6 درصد افزودنی 45 میکرون

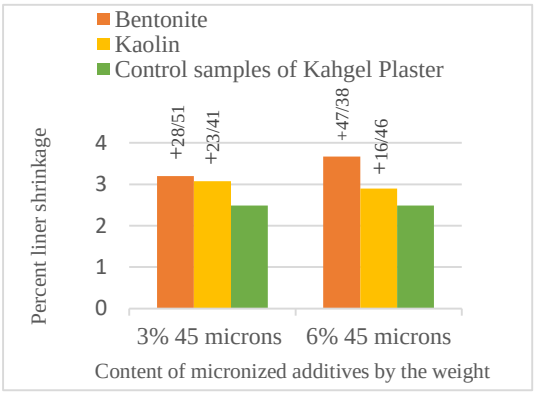
Table 16. Results of linear shrinkage of modified samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives45 microns

micronized additives	Percent of liner shrinkage	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 14
Bentonite	3.67	+47.38	+24.25
kaolin	2.9	+16.46	-5.34



شکل 7. نمودار تغییرات درصد انقباض خطی کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 150 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 7. Variation of percent of linear shrinkage of modified samples of Kahgel plaster with additives 150 microns



شکل 8. نمودار تغییرات درصد انقباض خطی کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 45 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 8. Variation of percent of linear shrinkage of modified samples of Kahgel plaster with additives 45 microns

3-5- نتایج اندازه‌گیری میزان فرسایش نمونه‌های کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی تحت بارش مصنوعی

مهمترین ضعف مصالح خاکی از جمله کاهگل، ضعف آن‌ها در مقابل رطوبت و دوام پایین و فرسایش شدید آنها تحت تاثیر بارندگی است، بنابراین یکی از اهداف اصلی این تحقیق افزایش دوام و ماندگاری اندود کاهگل در برابر رطوبت و بارندگی با بکارگیری مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی و بهبود خواص فیزکی و مکانیکی ملات، به ویژه خاصیت عایق‌بندی اندود بود. برای ارزیابی میزان دوام اندود کاهگل در برابر بارندگی از آزمایش فرسایش تحت بارش مصنوعی با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شد؛ برای این منظور، از هر نمونه ملات کاهگل، سه نمونه آزمایشی با قالبی به شکل مکعب مستطیل به ابعاد 3×10×10 سانتیمتر تهیه شد و پس از خشک شدن آنها، همچون سایر نمونه‌های مورد آزمایش در سن 14 روزه‌گی، مورد آزمایش قرار گرفت.

در این آزمایش از یک دستگاه شبیه‌ساز صحرایی مولد قطره بدون فشار، طراحی شده بر اساس مدل معروف هلندی دانشگاه ویگنگن استفاده شد. میانگین ارتفاع بارش دستگاه، 55 سانتیمتر و میانگین قطر قطرات باران تولیدی بوسیله باران ساز 4.5 میلیمتر و مساحت پلات دستگاه 0.25 متر مربع بود (شکل 11). پس از کالیبراسیون دستگاه شبیه‌ساز باران، هر گروه سه‌تایی نمونه‌های ملات کاهگل به طور همزمان داخل پلات دستگاه با شیب ملایم 11 درصد قرار گرفته و به شرح زیر تحت بارش مصنوعی باران قرار گرفت.

نخست تمامی نمونه‌ها قبل آزمایش با ترازویی با دقت 0.01 گرم به دقت توزین و ابعاد آنها به طور دقیق با کولیس با دقت 0.01 میلیمتر، اندازه‌گیری شد، سپس به منظور خشک شدن رطوبت جذب سطحی نمونه‌ها، مجددا تمامی آن‌ها به مدت 24 ساعت در آون با دمای 50 درجه سانتیگراد خشک گردید و پس از خروج از آون و سرد شدن، مجددا توزین و وزن دقیق نمونه، قبل آزمایش ثبت شد. در پایان برای انجام آزمون، تمامی نمونه‌های مورد آزمایش، پس از قرارگیری بر روی صفحه‌ای شیشه‌ای به ابعاد خود

نمونه به منظور سهولت جابجایی نمونه پس از آزمایش، نمونه‌های تهیه شده از هر ترکیب ملات کاهگل به طور همزمان به مدت 30 دقیقه تحت بارش مصنوعی باران با شدت ثابت 120 میلیمتر بر ساعت قرار گرفت. پس از پایان آزمون، نمونه‌های کاهگل فرسایش یافته، به کمک صفحه شیشه‌ای قرار داده شده در زیر آنها به آرامی برداشته شده و برای خشک شدن، ابتدا به مدت 48 ساعت در محیط آزمایشگاه قرار داده شد تا رطوبت سطحی آن کاهش یابد و سپس 24 ساعت در آون با دمای 60 درجه سانتیگراد و 24 ساعت دیگر در آون با دمای 80 درجه سانتیگراد قرار گرفت تا کاملا خشک شود. پس از خروج نمونه از آون و سرد شدن آن، وزن نمونه‌ها و میزان هدر رفت ماده جامد بدنه نمونه‌ها در اثر فرسایش تحت بارش مصنوعی نسبت به وزن کل خشک اولیه آنها به درصد محاسبه گردید و علاوه بر این میزان نفوذ باران و فرسایش ایجاد شده در سطح نمونه‌های ملات کاهگل

از طریق اندازه‌گیری عمق سوراخ‌های ایجاد شده در سطح نمونه‌ها با کولیس و تعیین میانگین آنها تعیین شد و سپس میانگین درصد هدر رفت و عمق نفوذ ایجاد شده در سطح هر گروه از نمونه‌های کاهگل محاسبه گردید و نتایج آن با نمونه‌های شاهد و کنترل (نمونه‌های کاهگل معمولی بدون ماده افزودنی) مقایسه و میزان تاثیر مثبت یا منفی بکارگیری افزودنی بر دوام ملات کاهگل در برابر فرسایش تحت بارش مصنوعی تعیین شد که نتایج آن به شرح مندرج در جداول 17-20 و اشکال 9-10 می‌باشد:

جدول 17. نتایج اندازه‌گیری درصد هدررفت بدنه نمونه‌های کاهگل با 3 درصد افزودنی 45 میکرون

Table 17. Results of percent of total dry material loss of improved samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives 45 microns

micronized additives	Percent of total dry material loss	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 17
Bentonite	4.05	-22.85	-31.99
kaolin	3.60	-31.42	-14.66

جدول 18. نتایج اندازه‌گیری درصد هدررفت بدنه نمونه‌های کاهگل با 6 درصد افزودنی 45 میکرون

Table 18. Results of percent of total dry material loss of improved samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives 45 microns

micronized additives	Percent of total dry material loss	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 18
Bentonite	4.61	-12.19	+1.9
kaolin	4.79	-8.76	-2.48

جدول 19. نتایج اندازه‌گیری درصد هدررفت بدنه نمونه‌های کاهگل با 3 درصد افزودنی 150 میکرون

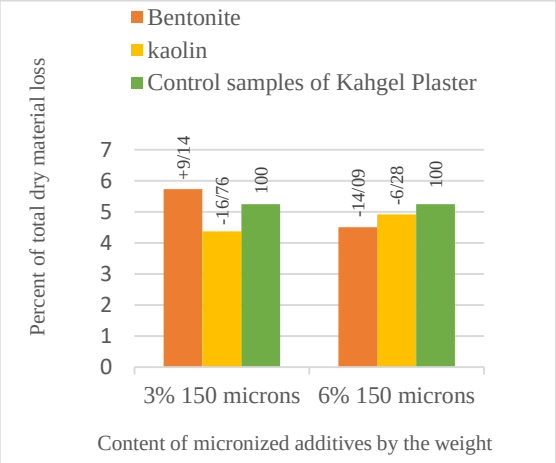
Table 19. Results of percent of total dry material loss of improved samples of Kahgel plaster with 3% by weight of additives 150 microns

micronized additives	Percent of total dry material loss	Variation compared to the control samples (%)
Bentonite	5.73	+9.14
kaolin	4.37	-16.76
Control samples of Kahgel Plaster	5.25	

جدول 20. نتایج اندازه‌گیری درصد هدررفت بدنه نمونه‌های کاهگل با 6 درصد افزودنی 150 میکرون

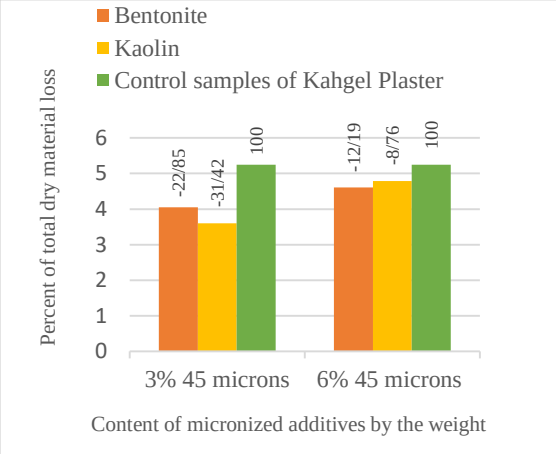
Table 20. Results of percent of total dry material loss of improved samples of Kahgel plaster with 6% by weight of additives 150 microns

micronized additives	Percent of total dry material loss	Variation compared to the control samples (%)	Variation compared to results of table 17
Bentonite	4.51	-14.09	-23.23
kaolin	4.92	-6.28	+10.48



شکل 9. نمودار تغییرات درصد هدررفت بدنه کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 150 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 9. Variation of Percent of total dry material loss of improved samples of Kahgel plaster with additives 150 microns



شکل 10. نمودار تغییرات درصد هدررفت بدنه کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی 45 میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

Fig. 10. Variation of Percent of total dry material loss of improved samples of Kahgel plaster with additives 45 microns

شکل 11. دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده برای تعیین میزان فرسایش و دوام نمونه‌های کاهگل تحت بارش مصنوعی

Fig. 11. Measurement of water erosion of the Kahgel plaster samples by rainfall simulator

بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان فرسایش نمونه‌های کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی تحت بارش مصنوعی و مقایسه نتایج با نمونه کاهگل شاهد، حاکی از آن بود که مواد افزودنی میکرونیزه انتخابی، تاثیر مثبتی در کاهش میزان فرسایش اندود کاهگل در مقابل بارندگی به دنبال دارد. بیشترین تاثیر در کاهش میزان فرسایش و هدر رفت ماده جامد بدنه نمونه‌های کاهگل در پایین‌ترین غلظت افزودنی با دانه‌بندی 150 میکرون در نمونه‌هایی مشاهده می‌شود که با افزودنی کائولن، بهسازی شده‌اند، به طوری که تنها 3 درصد کائولن 150 میکرون میزان هدر رفت بدنه نمونه‌های کاهگل تحت بارش را نسبت به نمونه‌های کنترل 16.76 درصد کاهش داده است و با کوچکتر شدن دانه‌بندی کائولن از 150 به 45 میکرون، میزان تاثیر این ماده افزودنی در کاهش میزان فرسایش کاهگل در مقابل بارندگی تا 31.42 درصد افزایش می‌یابد. استفاده از بنتونیت 150 میکرون در غلظت بالاتر 6 درصد تاثیر خود را در افزایش دوام کاهگل با کاهش 6.28 درصدی فرسایش نمونه‌ها در مقابل بارندگی نشان داده است و این تاثیر با کاهش دانه‌بندی بنتونیت مصرفی به 45 میکروت به میزان 3 درصد وزنی تا 22.85 درصد افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از ارزیابی میزان دوام نمونه‌های کاهگل بهسازی شده با مواد افزودنی میکرونیزه تحت بارش مصنوعی با دستگاه شبیه‌ساز باران حاکی از آن است که با کاهش دانه‌بندی مواد افزودنی از 150 میکرون به 45 میکرون تاثیر مثبت این مواد در افزایش دوام کاهگل در مقابل بارندگی ارتقاء می یابد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بعضی از خواص مهم فیزیکی و مکانیکی ملات سنتی کاهگل بهسازی شده با بنتونیت و کائولن میکرونیزه، شامل: ضریب نفوذپذیری آب، مقاومت فشاری، درصد انقباض خطی و میزان دوام در مقابل بارندگی در نمونه‌های آزمایشگاهی ملات کاهگل جدید بهبودیافته و کاهگل معمولی (نمونه شاهد و کنترل)، با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت و سپس نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه گردید. با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات فوق می توان گفت که استفاده از این مواد افزودنی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مورد نظر داشته است؛ به طوری که بکارگیری برخی از مواد افزودنی خاص، نظیر بنتونیت و کائولن با دانه‌بندی میکرونیزه به میزان کم می‌تواند به شدت نفوذپذیری اندود سنتی کاهگل را در مقابل آب کاهش دهد. با توجه به آزمایشات اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری اندود کاهل با بار افتان و نتایج حاصل آن، به نظر می‌رسد که استفاده از کائولن میکرونیزه به میزان بهینه، نتیجه مطلوبی در کاهش نفوذپذیری اندود کاهگل در مقابل آب به دنبال داشته است. از سوی دیگر چون عایق‌بندی بعکس حالت نفوذپذیری است، می‌توان گفت که کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاهل ناشی از بکارگیری این مواد افزودنی میکرونیزه، نشان‌دهنده بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل است که مهمترین کارکرد حفاظتی این اندود سنتی در معماری و حفاظت بناهای تاریخی خشت و گلی است.

علاوه بر این، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری در این پژوهش، حاکی از آن است که استفاده از بنتونیت و

کائولن میکرونیزه می‌تواند مقاومت مکانیکی کاهگل را نیز به طور چشمگیری تا حدود 40 درصد افزایش دهد.

از سوی دیگر ارزیابی میزان دوام نمونه‌های کاهگل بهسازی شده با این مواد افزودنی در مقابل بارندگی مصنوعی و مقایسه نتایج با نمونه‌های کاهگل معمولی کنترل حاکی از افزایش دوام نمونه‌های کاهگل بهبود یافته با مواد افزودنی میکرونیزه بود.

با توجه به مطالعات و آزمایشات انجام شده و جداول و نمودارهای حاصل که در این نوشتار ارائه شده است می‌توان گفت که نه تنها نوع و درصد مواد افزودنی مصرفی، بلکه ابعاد و دانه‌بندی آنها نیز، نقش بسیار مهمی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل دارد به طوری که با کاهش ابعاد ماده افزودنی در مقیاس میکرونیزه از 150 میکرون به 45 میکرون، به دلیل افزایش سطح ویژه مواد، تاثیر مثبت مواد افزودنی فوق در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل نیز افزایش می‌یابد.

جمع‌بندی نتایج مجموع آزمایشات و مطالعات حاکی از آن است که با توجه به نقش کلیدی اندود کاهگل به عنوان یک عایق رطوبتی سنتی در معماری خاکی و حفاظت بناهای تاریخی خشت و گلی و همچنین اهمیت بسزای کنترل میزان انقباض این ملات گلی به منظور کاهش میزان ترک خوردگی پس از خشک شدن، در میان بنتونیت و کائولن میکرونیزه، استفاده از پودر کائولن میکرونیزه نتیجه بهتری در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل، به ویژه خاصیت عایق‌بندی و دوام آن به دنبال دارد.

از سوی دیگر، استفاده از روش‌های آزمایشگاهی استاندارد سایر مصالح ساختمانی برای ارزیابی و سنجش ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی اندود سنتی کاهگل در این پژوهش، نشان داد که هر چند می‌توان از برخی از این روش‌های آزمایشگاهی برای مطالعه مواد و مصالح خاکی استفاده نمود ولی با توجه به محدودیت‌ها و حساسیت‌های خاص این گروه از مصالح سنتی، تلاش محققین و متخصصان برای استانداردسازی روشهای آزمایشگاهی به طور ویژه به منظور ارزیابی مواد و مصالح خاکی کاملا لازم و ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این، بکارگیری روش آزمایشگاهی استاندارد تعیین ضریب نفوذپذیری خاک با بار افتان برای اولین بار به منظور اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری اندود کاهگل در مقابل آب بیانگر آن بود که این روش آزمایشگاهی به عنوان روشی استاندارد برای ارزیابی تغییرات میزان نفوذپذیری مصالح خاکی در مقابل آب و به تبع آن ارزیابی میزان عایق‌بندی این مصالح در برابر رطوبت و بارندگی از کارایی خوبی برخوردار است.

مراجع

[1] Minke, G.; "*Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*", WIT Press, Computational Mechanics, **2000**.

[2] Roy, S; Chowdhury, S.; "*Earth as an Energy Efficient and Sustainable Building Material"*, International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS), vol. 1, No. 2. p.p. 248-252. **2013**.

[3] Dethier, J.; "*Down to earth: mud architecture, an old idea, a new future: based on an exhibition at the Centre Georges Pompidou*", Thames and Hudson. **1982**.

[4] Houben, H.; Guillaud, H. "Earth *Construction: A Comprehensive Guide, Intermediate technology"*, Publications, London, **1994**.

[5] Alva balderrame, A.; "*Earthen architecture"*, the Getty conservation institute Newsletter, vol. 16, No. 1, Los Angeles. **2001**.

[6] Keefe, L.; "Earth *building: methods and materials, repair and conservation*", Taylor & Francis, London and New York, **2005**.

[7] Fratini, F.; Pecchioni, E.; Rovero, L.; Tonietti, U.; "*The earth in the architecture of the historical centre of Lamezia Terme (Italy): characterization for restoration*", Applied Clay Science, vol. 53, No. 3, p.p. 509-516, **2011**.

[8] Warren, J.; "*Conservation of earth structures"*, Butterworth-Heinemann, **1999**.

[9] Craterre.; "Earthen architecture around the world", CRAterre, http://www.craterre.org/?new_lang=en_GB. **2015**.

[10] *Statistical Centre of Iran*. Country statistical journal, Statistical Centre of Iran, Iran, Tehran, **2011**, (in Persian).

[11] Maheri, M. R.; Maheri, A. R.; Pourfallah, S.; Azarm, R.; Hadjipour, A.; "*Improving the Durability of Straw-Reinforced Clay Plaster Cladding for Earthen Buildings",* International Journal of Architectural Heritage, vol. 5, No. 3, p.p. 349-366, **2011**.

[12] Nwankwor, N. A.; "*Justification for the Combination of Organic and Inorganic Stabilizers to Stabilize Traditional Earth Materials (Mud) for Quality and Capacity Utilization in Africa"*, In Terra 2008: The 10th

Journal of Cultural Heritage, vol. 16, p.p. 831–837, **2015**.

[21] Corrêa, A. A. R.; Mendes, L. M.; Barbosa, N. P.; de Paula Protásio, T.; de Aguiar Campos, N.; Tonoli, G. H. D.; "*Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva",* in adobes, Construction and Building Materials, vol. 98, p.p. 250-256, **2015**.

[22] Calatan, G.; Hegyi, A.; Dico, C.; Mircea, C.; "*Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks",* Procedia Technology, vol. 22, p.p. 259-265, **2016**.

[23] Sharma, V.; Vinayak, H. K.; Marwaha, B. M.; "*Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement"*, International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 4, No. 2, p.p. 348-358, **2015**.

[24] Roohbakhshan, A.; &Kalantari, B.; "*Stabilization of Clayey Soil with Lime and Waste Stone Powder",* Amirkabir Journal of Civil Engineering, vol. 4, No. 48, p.p. 429-438, **2016**. (In Persian).

[25] Espuelas, S.; Omer, J.; Marcelino, S.; Echeverría, A.M.; Seco, A.; "*Magnesium oxide as alternative binder for unfired clay bricks manufacturing"*, Applied Clay Science, vol. 146, p.p. 23-26, **2017**.

[26] Oskouei, A.V.; Afzali, M.; and Madadipour, M.; "*Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests"*, Construction and Building Materials, vol. 142, p.p. 137-147, **2017**.

International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage, Getty Publications, p.p. 239-246. **2011**.

[13] Alavéz-Ramírez, R.; Montes-García, P.; Martínez-Reyes, J.; Altamirano-Juárez, D. C.; Gochi-Ponce, Y.; "*The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks"*, Construction and Building Materials, vol. 34, p.p. 296-305. **2012**.

[14] Miqueleiz, L.; Ramirez, F.; Oti, J.E.; Seco, A.; Kinuthia, J.M.; Oreja, I.; Urmeneta, P.; "*Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production*", Engineering Geology, vol. 74, p.p. 68-74, **2013**.

[15] Trivedi, J. S.; Nair, S.; Iyyunni, C.; "*Optimum utilization of fly ash for stabilization of sub-grade soil using genetic algorithm",* Procedia Engineering, vol. 51, p.p. 250-258, **2013**.

[16] Anupam, A. K.; Kumar, P.; "*Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction"*, Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 104, p.p. 264-274. **2013**.

[17] El-Mahllawy, M.S.; Kandeel, A.M.; "*Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks*", HBRC Journal, vol. 10, No. 1, p.p. 82-91, **2014**.

[18] Georgiev, G.; Theuerkorn, W.; Krus, M.; Kilian, R.; Grosskinsky, T.; "*The potential role of cattail-reinforced clay plaster in sustainable building*", Mires and Peat, vol. 13, p.p. 1-13, **2014**.

[19] Hejazi, M.; Hashemi, M.; Jamalinia, E.; Batavani, M.; "*Effect of Additives on Mechanical Strengths of Adobe Made From Soils of Isfahan*", Journal of Housing and Rural Environment, vol. 34, No. 151, p.p. 67-80, **2015**. (In Persian).

[20] Zhang, J.; Chen, W.; Li, Z.; Wang, X.; Guo, Q.; Wang, N.; "*Study on workability and durability of calcined ginger nuts-based grouts used in anchoring conservation of earthen sites"*,