تأثیر افزودنی‌های میکرونیزه سیلیکاتی در کاهش نفوذپذیری و فرسایش ناشی از بارش مصنوعی اندود کاه‌گل

مسعود باتر[۱و۲*]، حسین احمدی[۲] و رحمت اله عمادی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۶)

چکیده

کاه‌گل یکی از قدیمی‌ترین ملات‌های سنتی ایران است که قابلیت‌ها و تجربیات استفاده از آن در گذشته، نشان‌دهنده آن است که می‌توان از آن، به‌عنوان 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 به‌منظور افزایش دوام و طول عمر مفید اندود کاه‌گل، بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. در این تحقیق تأثیر کاربرد مواد افزودنی سیلیکاتی میکرونیزه، (شامل میکروسیلیس، فلدسپات، زئولیت، بنتونیت و کائولن) در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاه‌گل به‌روش تجربی با تعیین ضریب نفوذپذیری و میزان دوام آن، تحت فرسایش آبی با دستگاه شبیه‌ساز باران، نشان داد که استفاده از این مواد افزودنی در مقیاس میکرونیزه، خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاه‌گل را به‌طور چشمگیری ارتقاء می‌دهد. نتایج آزمایشات حاکی از آن است که استفاده از سه درصد وزنی کائولن ۱۵۰میکرون تا ۶۵ درصد و سه درصد زئولیت ۴۵ میکرون تا ۸۵ درصد، ضریب نفوذپذیری کاه‌گل را کاهش و خاصیت عایق‌بندی آن را ارتقاء می‌دهد، به‌علاوه، ارزیابی میزان دوام نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارش مصنوعی با دستگاه شبیه‌ساز باران نشان داد که استفاده از سه درصد وزنی میکروسیلیس، فلدسپات، زئولیت و کائولن میکرونیزه، میزان هدر رفت ماده جامد در نمونه‌ها را حداقل تا ۱۰/۵ درصد و حداکثر تا ۳۷/۷ درصد کاهش و دوام آنها را در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی افزایش می‌دهد. به‌علاوه، نتایج حاصل از مطالعات بیانگر آن است که با کاهش اندازه ذرات ماده افزودنی، میزان تأثیر مثبت آنها نیز در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاه‌گل افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، درصد بهینه استفاده از مواد افزودنی سیلیکاتی میکرونیزه برای بهسازی اندود کاه‌گل سه درصد وزنی است و افزایش میزان ماده افزودنی، تأثیر چندانی در ادامه روند بهسازی خواص فیزیکی و مکانیکی کاه‌گل ندارد.

واژه‌های کلیدی: معماری خشت و گلی، کاه‌گل، مواد افزودنی میکرونیزه، سیلیکات‌ها، حفاظت

۱. گروه مرمت آثار تاریخی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه زابل
۲. گروه مرمت آثار تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان
۳. گروه مهندسی مواد، دانشکدهٔ مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: masoud.bater@gmail.com

مقدمه

از گذشته‌های دور، اندود کاه‌گل در ایران، به‌عنوان یک پوشش، برای محافظت و عایق‌بندی بناهای خشت و گلی در مقابل رطوبت و بارندگی استفاده می‌شده است. معایب این اندود سنتی، همچون: دوام و طول عمر کم، مقاومت و استحکام پایین در مقابل فرسایش، چسبندگی کم، تخریب شدید و وارفتگی در مقابل رطوبت و آب‌شستگی، ضعف در مقابل تهاجم عوامل بیولوژیک از جمله موریانه و انقباض بالا و ترک خوردگی شدید آن پس از خشک شدن؛ موجب شده است که استفاده از آن به‌تدریج در معماری دوران معاصر، منسوخ گردد.

با وجود معایب بسیاری که اندود کاه‌گل دارد، به دلیل سازگاری خوب آن با ساختار بناهای خشت و گلی، هنوز هم از این اندود سنتی در حفاظت بسیاری از بناها و محوطه‌های باستانی خشت و گلی استفاده می‌شود. عایق‌بندی بدنه خارجی بنا با اندود کاه‌گل برای حفاظت آن، در مقابل رطوبت و بارندگی، اهمیت بسیاری دارد، چون بدین ترتیب، ساختارهای خشتی بنا از آسیب ناشی از عوامل محیطی، به‌ویژه بارندگی مصون مانده و محافظت می‌شوند. با این وجود، چون خودکاه‌گل، به‌عنوان پوشش خارجی بنا به‌طور دائم، در معرض بارندگی و عوامل مخل محیطی است، به‌تدریج فرسایش یافته و قابلیت عایق‌بندی خود را از دست می‌دهد؛ به همین خاطر، معمولا، بعد از یک تا دو سال، بایستی اندود کاه‌گل دوباره تجدید شود.

پژوهش‌های انجام شده در مورد بهبود خواص خاک، حاکی از آن است که با برخی از مواد افزودنی خاص می‌توان، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و مصالح خاکی، همچون خشت را بهبود بخشید؛ بنابراین با توجه به لزوم تجدید دائمی اندود کاه‌گل، پس از هر بار فرسایش 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، به‌ویژه رطوبت و بارندگی، مطالعه برای یافتن مواد افزودنی مناسب به‌منظور افزایش دوام و طول عمر مفید اندود کاه‌گل بسیار لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد، زیرا اندود کاه‌گل، بخش جدایی ناپذیری از هویت معماری کشور ما در بسیاری از بناهای تاریخی شهری و روستایی است که تلاش برای احیاء آن از اهمیت بسیاری برخوردار است.

تثبیت مصالح خاکی با استفاده از افزودنی‌های آلی و معدنی در آفریقا، شامل: خاکستر پوسته برنج، آهک، سیمان و کاه، نشان داد که استفاده از این مواد تثبیت کننده، می‌تواند خواص مکانیکی و دوام مصالح خاکی را به طور چشمگیری بهبود بخشد. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه، گویای آن است که افزودن ترکیبی از ۳۰ درصد خاکستر پوسته برنج، ۲/۵ درصد سیمان و ۲/۵ درصد آهک به بلوک های گل فشرده، مقاومت فشاری و دوام آنها را در مقابل فرسایش آبی به میزان قابل ملاحظه‌ای ارتقاء داده است (۱۵). پژوهش برروی بهبود دوام کاه‌گل، با هدف افزایش مقاومت آن در برابر رطوبت و فرسایش ناشی از بارندگی، با استفاده از آهک شکفته و پودر سنگ نشان داد که افزودن ۱۰ درصد آهک شکفته به همراه ۱۰ درصد پودر سنگ به اندود کاه‌گل ساخته شده با دو درصد کاه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دوام اندود کاه‌گل را در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (۱۳). استفاده از ضایعات آلومینا و زباله حاصل از خاکستر ذغال سنگ و افزودن آنها به ترکیب خشت‌های تهیه شده از خاک رس مارنی منجر به تهیه خشتی با مقاومت فشاری و دوام بالا شد (۱۴). استفاده از خاکستر بادی برای تثبیت خاک، علاوه بر تحکیم آن، ظرفیت باربری خاک را نیز ارتقاء داد (۱۸). بررسی روش‌های باستانی و جدید بهبود دوام مصالح خاکی با استفاده از آهک و سیمان و ترکیب آنها با روغن نشان داد که فرآیندهای هیدراتاسیون آهک داغ با روغن به همراه هیدورکسید سدیم، به‌طور قابل توجهی موجب بهبود خواص و دوام مصالح خاکی می‌شود. استفاده از آهک، علاوه بر بهبود مقاومت مکانیکی مصالح خاکی، جذب آب و فرسایش ناشی از بارندگی را نیز در این مصالح کاهش می‌دهد، به‌علاوه استفاده از روغن و سدیم هیدروکسید به‌طور قابل توجهی عملکرد و تأثیر

آهک را در بهبود خواص مصالح ارتقاء می‌دهد (۹). تثبیت خاک با استفاده از ضایعات مختلف کشاورزی و صنعتی، شامل: خاکستر بادی ذغال سنگ، خاکستر پوسته برنج، خاکستر باگاس و خاکستر کاه برنج، نشان داد که استفاده از این مواد، ضمن تثبیت خاک سبب ارتقاء چشمگیر ظرفیت باربری خاک می‌گردد (۵). تهیه خشت با رس مونتموریلونیتی و تثبیت آن با ۳۰ درصد آهک و ۱۵ درصد سیمان، در مصر نشان داد که قدرت و تأثیر سیمان در تثبیت خشت بیشتر از آهک است، چون هیدروکسید کلسیم تولید شده از هیدراتاسیون سیمان فعال‌تر از آهک هیدراته می‌باشد (۱۰). استفاده از الیاف گیاه لوئی در ترکیب اندودهای گلی، 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 داده و بدین ترتیب موجب دوام بیشتر اندودهای گلی شده است (۱۱). تثبیت و تحکیم بلوک‌های گلی با استفاده از آهک و سیمان، نشان داد که این مواد افزودنی موجب می‌شود، مقاومت فشاری بلوک‌های گلی از حد استاندارد لازم برای ساخت و ساز با مصالح خاکی (سه مگا پاسگال) بسیار بیشتر گردد و علاوه بر این، نرخ جذب آب نمونه بلوک‌های گلی تثبیت شده نیز نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش یابد. نتایج حاصل از آزمایشات حاکی از آن است که تأثیر سیمان در بهبود مقاومت فشاری و کاهش جذب آب این مصالح از آهک بیشتر است (۶). بررسی تأثیر مواد افزودنی مختلف شامل: ماسه، گچ، آهک، پودر آجر و کاه بر مقاومت مکانیکی خشت‌های ساخته شده از خاک اصفهان نشان داد که با استفاده از ماسه و گچ می‌توان مقاومت فشاری خشت را به‌طور 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 (۲). تحقیق برروی کاربرد افزودنی‌های مختلف، از جمله: ماسه سنگ مخلوط با خاکستر بادی، شن و ماسه کوارتزی برروی 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، وجود خاکستر بادی مقاومت دوغاب را در برابر نوسانات دما، رطوبت و حمله سولفات‌ها افزایش می‌دهد و شن و ماسه کوارتزی نیز مقاومت آن را در مقابل فرسایش ناشی از انجماد و وارفتگی بالا می‌برد. وجود این ویژگی‌های مطلوب، این دوغاب را برای حفاظت محوطه‌های باستانی و معماری خاکی مناسب می‌نماید (۱۹). پژوهش به‌منظور افزایش دوام خانه‌های روستایی خشت و گلی هندوستان با استفاده از الیاف گیاهان بومی حاکی از آن است که استفاده از الیاف گیاهی به‌دست آمده از گیاهان بومی منطقه همیرپور در شمال ایالت هیماچال پرادش هندوستان، شامل الیاف کاج راکسبرگ بومی هیمالیا و الیاف گیاه بومی اپتیوا از خانواده گل ختمی و افزودن آنها به ترکیب خشت مورد استفاده در ساخت خانه‌های روستایی این منطقه موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری خشت شده و بدین ترتیب با افزایش ظرفیت باربری مصالح خشتی امکان کاهش ضخامت دیوارهای خانه‌های روستایی و افزایش فضای داخلی اتاق‌های آن مطابق با نیازهای امروزی برای زندگی مدرن فراهم می‌گردد (۱۶). بررسی تأثیر استفاده از بزاق مصنوعی موریانه و ذرات بامبو در تهیه خشت، نشان داد که با این مواد افزودنی انقباض خطی، درصد جذب آب و میزان فرسایش آبی در خشت کاهش یافته و افزودن ۶ درصد ذرات بامبو به خشت مقاومت فشاری آن را تا ۹۰ درصد افزایش می‌دهد (۸). بررسی تأثیر استفاده از الیاف کنف در ترکیب خشت، بیانگر آن بود که استفاده از الیاف گیاهی کنف به میزان بهینه ۱۰-۹ 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 (۷).

جمع‌بندی پیشینه مطالعات انجام شده، حاکی از آن است که بیشتر پژوهش‌ها، برروی بهسازی مصالح باربر مورد استفاده در معماری، همچون: خشت و بلوک‌های گلی متمرکز بوده و بیشتر آنها، با هدف افزایش مقاومت مکانیکی و توانبخشی این مصالح

انجام شده است ولی در این تحقیقات به بهبود خواص اندودهای گلی، همچون کاه‌گل، کمتر توجه شده است. علاوه بر این، با وجود آن که مهمترین نقش اندود کاه‌گل، عایق‌بندی و حفاظت بناهای خشت و گلی در مقابل فرسایش ناشی از رطوبت و بارندگی بوده است ولی تا کنون پژوهشی اختصاصی و جامع در این زمینه، به‌منظور بهبود و ارتقاء خاصیت عایق‌بندی و دوام اندود کاه‌گل برای استفاده از آن به‌عنوان یک پوشش حفاظتی کارآمد و بادوام در بناهای تاریخی انجام نشده است.

از سوی دیگر، در تمامی پژوهش‌های انجام شده ، تنها تأثیر 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 فوق‌العاده 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، به‌طوری 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 به‌تدریج 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 این اندود سنتی است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌روش تجربی، با مطالعات آزمایشگاهی برروی ملات کاه‌گل با استفاده از مواد افزودنی سیلیکاتی میکرونیزه با هدف بهبود خاصیت عایق‌بندی و افزایش دوام و ماندگاری آن انجام شده است. برای این منظور پس از تهیه خاک مناسب، ابتدا ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی خاک تعیین شد. با توجه به اهمیت درصد الیاف کاه موجود در ترکیب ملات کاه‌گل و تأثیر آن بر خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی ملات، برای دستیابی به درصد بهینه کاه در ترکیب کاه‌گل، پس از انتخاب خاک مناسب، نمونه‌های مختلفی از این ملات با درصدهای مختلف کاه گندم تهیه شد و سپس با استفاده از قالب‌های آزمایشگاهی استاندارد، برای هر آزمون، سه نمونه آزمایشگاهی از ملات کاه‌گل تهیه گردید: نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد ۳×۱۰×۱۰ سانتی‌متر برای بررسی وضع ظاهری و میزان ترک‌های سطحی ملات؛ نمونه‌های نیم‌استوانه‌ای استاندارد به طول ۱۴ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری درصد انقباض خطی ملات و نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری برای کنترل میزان تراکم و فشردگی ملات در داخل قالب‌ها، هنگام قالب‌گیری، میزان تراکم آنها با توزین و یکسان نمودن وزن ملات درون هر یک از قالب ها، سعی شد تا شرایط آزمایشگاهی نمونه‌ها کنترل و همسان گردد. برای خشک کردن تدریجی نمونه‌های ملات، با شرایط یکسان، به‌منظور جلوگیری از ترک خوردن آنها در هنگام خشک شدن، ابتدا تمامی نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در سایه، در محیط آزمایشگاه قرار داده شد، تا به آرامی رطوبت سطحی نمونه ها کاهش یافته و اندکی خشک شوند، سپس نمونه‌های کاه‌گل به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا تقریبا خشک شوند و در مرحله پایانی برای خشک شدن کامل آنها، ۲۴ ساعت دیگر نمونه‌های کاه‌گل در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. پس از خروج نمونه‌ها از قالب و توزین مجدد، تمامی آنها به‌مدت ۱۴ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری شد و پس از رسیدن سن نمونه ها به ۱۴ روز، نمونه‌های تهیه شده مورد آزمایش قرار گرفت. بدین ترتیب، مناسب‌ترین ترکیب کاه‌گل از نظر میزان الیاف کاه برای انجام مراحل بعدی آزمایش انتخاب شد. در مرحله بعد، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد مطالعه، شامل: ضریب نفوذپذیری و میزان فرسایش تحت بارش در نمونه کاه‌گل بدون ماده افزودنی به‌عنوان گروه آزمایشی شاهد و کنترل مورد

جدول ۱. روش‌های مطالعه آزمایشگاهی نمونه ملات کاه‌گل

نوع آزمایش	روش آزمایش	کد استاندارد	شکل و ابعاد نمونه cm
تعیین مقاومت فشاری کاه‌گل	مقاومت فشاری تک	ASTM C۱۰۹-۹۰	مکعبی ۵×۵×۵
تعیین درصد انقباض خطی کاه‌گل	استفاده از قالب و آون	BS ۱۳۷۷- Part ۲	نیم استوانه‌ای، قطر ۲/۵و طول ۱۴
تعیین میزان فرسایش آبی ناشی از بارندگی	استفاده شبیه ساز باران		مکعب مستطیل ۳×۱۰×۱۰
تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان	استفاده از نفوذسنج	D۲۴۳۴-۶۸ ASTM	استوانه‌ای، ارتفاع ۳/۵ و قطر ۵

سنجش و ارزیابی قرار گرفت و سپس تأثیر استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکانی مختلف با دانه‌بندی متفاوت برروی همان خواص فیزیکی و مکانیکی در ملات کاه‌گل جدید اندازه‌گیری و سپس نتایج حاصل با نمونه‌های ملات کاه‌گل کنترل مقایسه شد. در تمامی مراحل نمونه‌سازی و مطالعات آزمایشگاهی، ترکیب ملات کاه‌گل از نظر، نوع خاک، بافت و دانه‌بندی خاک، نوع الیاف، میزان الیاف، نحوه تهیه، شیوه عمل‌آوری و مدت زمان عمل‌آوری ثابت درنظر گرفته شد و نوع و ابعاد ذرات ماده افزودنی به‌عنوان متغیر مستقل تحقیق، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در کلیه آزمایشات و آزمون‌های انجام شده تعداد نمونه‌های کاه‌گل کنترل و کاه‌گل بهسازی شده در هر نسبت ترکیب، حداقل سه نمونه بوده و نتایج به‌دست آمده، میانگین حاصل از حداقل سه تکرار در هر آزمون بوده است. پس از تهیه ملات کاه‌گل و عمل‌آوری آن با همزدن و ماندگاری تحت رطوبت به مدت ۷۲ ساعت، نمونه‌های آزمایشگاهی مختلفی از ملات کاه‌گل، مطابق **جدول ۱** برای تعیین مقاومت فشاری، درصد انقباض خطی، میزان فرسایش تحت بارش و ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها تهیه شد:

یکی از مهمترین موانع و مشکلات این پژوهش، عدم دسترسی به‌روش‌های آزمایشگاهی خاص مصالح خاکی، به‌ویژه کاه‌گل بود؛ یعنی روش‌های استانداردی که با ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاص این دسته از مصالح، تناسب و همخوانی داشته باشد؛ از اینرو در این تحقیق از روش‌های آزمایشگاهی استاندارد مورد استفاده در سایر مصالح ساختمانی برای ارزیابی و سنجش خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاه‌گل استفاده شد.

بنابراین، یکی از نوآوری‌های مهم این پژوهش، استفاده از روش‌های آزمایشگاهی استانداردی است که اولین بار، از آنها در این تحقیق برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی اندود کاه‌گل استفاده شده است.

روش انجام آزمایشات و آماده‌سازی نمونه‌های کاه‌گل برای ارزیابی هر یک از ویژگی های فیزیک و مکانیکی فوق به شرح زیر می‌باشد:

تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های ملات کاه‌گل آزمایشگاهی از منطقه دشت مهیار در جنوب اصفهان تهیه شد. پس از نمونه‌برداری خاک و انتقال آن به آزمایشگاه، از آن به‌روش چهار قسمتی، مطابق با استاندارد AASHTO ۲۴۸-۱۴، نمونه‌گیری شد (۱)، سپس برای شناخت ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک‌ها، شامل: تعیین درصد مواد آلی، اندازه‌گیری درصد رطوبت، آزمون دانه‌بندی، تعیین حدود اتربرگ، اندازه‌گیری چگالی ویژه خاک، تعیین pH، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، میزان انقباض خطی، مطابق با استانداردهای بین‌المللی و در شرایط آزمایشگاهی، استفاده گردید. برای تعیین دانه‌بندی خاک از آزمایش دانه‌بندی، بر طبق استاندارد ASTM ۸۷-D۴۲۲ استفاده شد. در آزمایش دانه‌بندی خاک، روش الک و هیدرومتری هر دو، توامان به‌کار رفت. در آزمون دانه‌بندی با الک، از الک‌های استاندارد ASTM به شماره مش‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ استفاده شد. در آزمون هیدورمتری از محلول

جدا کننده هگزا متا فسفات سدیم با غلظت چهار درصد وزنی و چگالی‌سنج استانداردH ۱۵۲ ASTM استفاده شد (۱ و ۳). نتایج حاصل از آزمون دانه‌بندی خاک برای تعیین بافت خاک، طبقه‌بندی خاک و تعیین پارامترهای مهم خاک (اندازه مؤثر و ضریب یکنواختی خاک) استفاده شد. به‌منظور بررسی رفتار نمونه‌های خاک تهیه شده در مقابل رطوبت و حالت خمیری و میزان قوام و پیوستگی آنها، حدود اتربرگ هر یک از نمونه‌ها، شامل: حد خمیری، حد روانی و دامنه خمیری براساس روش‌های آزمایشگاهی، مطابق با استاندارد D۴۳۱۸-۹۸ ASTM، اندازه‌گیری شد (۱۲). این آزمایشات برای هر نمونه خاک سه بار تکرار گردید و میانگین نتایج به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. برای اندازه‌گیری چگالی ویژه خاک، طبق استاندارد ASTM D۸۵۴-۰۲ از پیکنومتر استفاده گردید و از هر خاک، سه نمونه انتخاب و میانگین به‌دست آمده از سه تکرار به‌عنوان نتیجه آزمایش گزارش گردید (۱). برای تعیین درصد رطوبت هر نمونه خاک، سه نمونه از هر یک از خاک‌ها آماده گردید و سپس براساس استاندارد ASTM D۴۶۴۳-۰۰ با استفاده از آون نمونه خشک و درصد رطوبت آن نسبت به حالت خشک خاک محاسبه و اندازه‌گیری شد (۱۲). در این پژوهش، درصد انقباض خطی خاک و نمونه‌های کاه‌گل با آزمون استاندارد قالب و آون براساس استاندارد BS ۱۳۷۷-۲ Part اندازه‌گیری شد، تا ارزیابی نسبتاً دقیقی از رفتار انقباضی هر یک از نمونه‌های خاک و کاه‌گل در مقابل رطوبت به‌دست آید. بدین منظور سه آزمونه از هر نمونه مورد آزمایش تهیه و پس از خشک شدن آن، میزان کاهش طول نمونه با کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر تعیین و سپس محاسبات لازم انجام و میانگین نتایج به‌دست آمده به‌عنوان نتیجه‌نهایی گزارش شد (۱۷). برای تعیین pH نمونه‌های خاک، طبق استاندارد ASTM D۴۹۷۲، (۱۲) پس تهیه عصاره نمونه، از دستگاه پتانسیومتر مدل Ino lab pH ۷۳۰ ساخت کشور آلمان که قبلاً کالیبره شده بود، استفاده گردید. درصد مواد آلی خاک، پس از نمونه برداری، طبق استاندارد ASTM D۲۹۷۴، با حرارت دادن نمونه‌ها در کوره برقی تعیین شد (۱۲). برای اندازه‌گیری میزان هدایت الکتریکی خاک، طبق استاندارد ASTM D۴۹۷۲، پس از عصاره‌گیری، (۱۲) از دستگاه هدایت‌سنج Ino lab Terminal ۷۴۰ ساخت کشور آلمان که قبل از آزمایش با محلول استاندارد کالیبره شده بود، استفاده شد.

مواد افزودنی

برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاه‌گل به‌ویژه خاصیت عایق‌بندی آن از مواد افزودنی سیلیکاتی میکرونیزه در ابعاد ۱۵۰ و ۴۵ میکرون استفاده شد که شامل: میکروسیلیس، فلدسپات، زئولیت کلینوپتیلولایت، تالک، کائولن و بنتونیت بود که مشخصات فیزیکی و محل تهیه آنها در جدول (۲) آمده است.

تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های کاه‌گل

برای بررسی میزان تأثیر مواد افزودنی در بهبود مقاومت مکانیکی ملات کاه‌گل، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها، با دستگاه جک ملات شکن ساخت شرکت آزمون مبنای ایران، مطابق با استاندارد ASTM C۱۰۹-۹۰ در کارگاه مواد و مصالح دانشگاه هنر اصفهان مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت (۴). برای این منظور، پس از آماده‌سازی ملات و عمل‌آوری آن، به نحوی که پیشتر ذکر شد، ملات به وسیله قالب‌های استاندارد برنجی مکعبی شکل ساخت شرکت آزمون مبنا به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر قالب‌گیری شد. میزان تراکم و فشردگی ملات هر یک از نمونه‌های داخل قالب از طریق توزین آن و یکسان نمودن وزن نمونه‌های ملات داخل قالب‌ها کنترل گردید. پس از اتمام قالب‌گیری، نمونه‌ها به آرامی به‌روشی که قبلا شرح داده شد به‌تدریج خشک شد و تا رسیدن به سن ۱۴ روزه‌گی، در محیط آزمایشگاه نگهداری و سپس، مقاومت فشاری هریک از آنها با استفاده از جک ملات شکن تعیین شد. برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های کاه‌گل، از هر ترکیب سه نمونه آماده و مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین به‌دست آماده به‌عنوان

جدول ۲. مشخصات مواد افزودنی میکرونیزه مورد استفاده

نام ماده افزودنی	رنگ	شکل	محل تهیه
میکروسیلیس	سفید	پودر جامد	شرکت توما اصفهان
فلدسپات	سفید	پودر جامد	شرکت توما اصفهان
زئولیت	سفیدمتمایل به سبز	پودر جامد	اصفهان
تالک	سفید	پودر جامد	شرکت توما اصفهان
کائولن	سفید	پودر جامد	دانشگاه هنر اصفهان
بنتونیت	کرم روشن	پودر جامد	دانشگاه هنر اصفهان

نتیجه‌نهایی گزارش شد. نمونه‌ها از سطوح جانبی که کاملا صاف و یکدست بود، داخل دو فک فوقانی و تحتانی دستگاه مقاومت فشاری قرار داده شد و سپس نمونه‌ها با سرعت یک کیلوگرم بر ثانیه تحت بارگذاری دستگاه قرار داده شد، به محض بروز گسیختگی در سطح بدنه نمونه تحت بارگذاری، میزان بار وارده قرائت و ثبت شده و سپس مقاومت فشاری نمونه با واحد کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع محاسبه گردید.

تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاه‌گل با بار افتان

چون هدف اصلی این تحقیق، بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاه‌گل و به تبع آن دوام این اندود سنتی در مقابل رطوبت و بارندگی بود، تعیین ضریب نفوذپذیری ملات کاه‌گل، برای ارزیابی میزان تأثیر مواد افزودنی در بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاه‌گل از اهمیت بسیاری برخوردار بود. برای این منظور، از هر ترکیب ملات کاه‌گل، سه نمونه استوانه‌ای به ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر تهیه و در داخل سه دستگاه مجزای نفوذسنجی استاندارد قرار داده شد و سپس ضریب نفوذپذیری با بار افتان هریک از نمونه‌ها پس از رسیدن نمونه‌ها به حالت پایداری و تعادل در طول ۷۲ ساعت پس از عمل‌آوری، هر روز حداقل ۲۷ نوبت پی در پی، مجموعا ۸۱ نوبت اندازه‌گیری شد (۱) و بعد میانگین نتایج حاصله به‌عنوان نتیجه‌نهایی برای تعیین ضریب نفوذپذیری کاه‌گل با بار افتان محاسبه و گزارش گردید. در این مرحله، ابتدا ضریب نفوذپذیری نمونه کاه‌گل معمولی (کاه‌گل شاهد و کنترل بدون ماده افزودنی)، اندازه‌گیری شد و سپس بعد از تهیه نمونه‌های کاه‌گل جدید با استفاده از مواد افزودنی سیلیکاتی میکرونیزه، ضریب نفوذپذیری آنها به‌روش فوق تعیین شد و در پایان، نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری کاه‌گل معمولی (نمونه شاهد) با نمونه‌های کاه‌گل جدید تهیه شده با مواد افزودنی مقایسه گردید.

اندازه‌گیری میزان فرسایش نمونه‌های کاه‌گل تحت بارش مصنوعی با شبیه ساز باران

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 ۳×۱۰×۱۰ سانتی‌متر تهیه شد و پس از خشک شدن آنها، همچون سایر نمونه‌های مورد آزمایش در سن ۱۴ روزه‌گی، مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش از یک دستگاه شبیه‌ساز صحرایی مولد قطره بدون فشار، طراحی شده براساس مدل معروف هلندی دانشگاه واخینیگن استفاده شد (شکل ۲). میانگین ارتفاع بارش دستگاه، ۵۵ سانتی‌متر و میانگین قطر قطرات باران تولیدی به وسیله باران ساز ۴/۵ میلی‌متر و مساحت پلات دستگاه ۰/۲۵ متر مربع بود. پس از کالیبراسیون دستگاه شبیه‌ساز باران، نمونه‌های ملات کاه‌گل به‌طور همزمان داخل پلات دستگاه با شیب ملایم ۱۱ درصد قرار گرفته و به شرح زیر تحت بارش مصنوعی باران قرار گرفت. نخست تمامی نمونه‌ها قبل آزمایش به دقت توزین و ابعاد آنها به‌طور

شکل ۲. دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده برای تعیین میزان فرسایش و دوام نمونه‌های کاه‌گل تحت بارش مصنوعی

دقیق با کولیس، اندازه‌گیری شد، سپس به‌منظور خشک شدن رطوبت جذب سطحی نمونه‌ها، مجددا تمامی آنها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۵۰ 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 برروی صفحه‌ای شیشه‌ای به ابعاد خود نمونه به‌منظور سهولت جابجایی نمونه پس از آزمایش، نمونه‌های تهیه شده از هر ترکیب ملات کاه‌گل به‌طور همزمان به مدت ۳۰ دقیقه تحت بارش مصنوعی باران با شدت ثابت ۱۲۰ 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 ۴۸ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار داده شد تا رطوبت سطحی آن کاهش یابد و سپس ۲۴ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۴ ساعت دیگر در آون با دمای ۸۰ 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 تأثیر مثبت یا منفی به‌کارگیری افزودنی بر دوام ملات کاه‌گل در برابر فرسایش تحت بارش مصنوعی تعیین شد.

نتایج و بحث

نتایج مطالعات آزمایشگاهی خاک

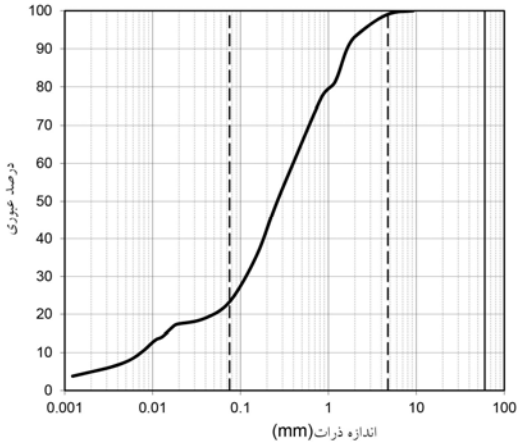
نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه خاک مورد استفاده و

جدول ۳. نتایج آزمایش دانه‌بندی نمونه خاک دشت مهیار اصفهان

درصد شن	۰/۹۲
درصد ماسه	۸۰/۴۴
درصد لای	۱۸/۶۵
درصد رس	۴/۶۳
D_{10}	۰/۰۰۷
D_{30}	۰/۱۱۱
D_{60}	۰/۳۹۷
Cc	۴/۲۵
C_U	۵۴/۲۱
طبقه‌بندی خاک آشتو	A-۲-۴(۰)
طبقه‌بندی خاک متحد	SC- Clayey Sand

جدول ۴. روش‌های مطالعه آزمایشگاهی نمونه خاک و نتایج آن

نوع آزمایش	روش آزمایش	کد استاندارد	نتیجه
حد روانی خاک (LL)	دستگاه کاساگرانده	D۴۳۱۸–۹۸ ASTM	۲۱/۵
حد خمیری خاک (PL)	روش فتیله کردن	D۴۳۱۸–۹۸ ASTM	۱۲/۲
دامنه خمیری خاک (PI)	اختلاف حد روانی و حد خمیری	D۴۳۱۸–۹۸ ASTM	۹/۳
دانه‌بندی خاک	الک و هیدرومتری	D۴۲۲–۸۷ ASTM	جدول ۳
درصد رطوبت خاک	خشک کردن در آون	D۴۶۴۳–۰۰ ASTM	۲/۳۴
چگالی ویژه خاک	استفاده از پیکنومتر	D۸۵۴–۰۲ ASTM	۲/۶۹
درصد انقباض خطی خاک	استفاده از قالب و آون	BS ۱۳۷۷- Part ۲	۶/۰۹
pH خاک	روش پتانسیومتری	D۴۹۷۲ ASTM	۷/۸۱
درصد مواد آلی خاک	استفاده از کوره	ASTM D۲۹۷۴	۱/۷۱
هدایت الکتریکی خاک	دستگاه هدایت سنج	D۴۹۷۲ ASTM	۱/۱۳



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی نمونه خاک انتخابی از دشت مهیار اصفهان

بررسی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی آن، مطابق با استانداردهای بین‌المللی به شرح مندرج در جدول‌های (۳) و (۴) و شکل (۱) است :

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 (جداول ۴-۳ و شکل ۱). 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 به‌دست آمده از اندازه‌گیری درصد انقباض

جدول ۵. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های گاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه

نمونه کاه‌گل	درصد وزنی کاه	مقاومت فشاری Kg/cm^2	درصد انقباض خطی	میانگین تعداد ترک‌های سطحی
CW۲h1	۲	۱۸/۰۴	۱/٦	۱۱
CW۳h1	۳	۱٦/٥٦	۱/۲۵	۹
CW۴h1	۴	۸/۵۳	۱	۶
CW۵h1	۵	۹/۰۵	۰/۹۵	۲/۳
CW۶h1	۶	۸/۴	۰/۹	۲
CW۸h1	۸	۸/۰٦	۰/۳	۲
CW۱۰h1	۱۰	۸/۴	۰/۵۵	صفر
CW۱۵h1	۱۵	۷/۷۵	۰/۳	صفر

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، نشان دهنده 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. 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، به‌نظر می‌رسد که خاک تهیه شده از دشت مهیار به دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مطلوب برای تهیه ملات کاه‌گل مناسب می‌باشد.

تعیین ترکیب بهینه ملات کاه‌گل با آزمایش

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 جدول (۵) می‌باشد:

بررسی نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه های کاه گل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه حاکی از آن است که با افزایش درصد الیاف در ترکیب کاه‌گل، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز به دلیل کاهش ذرات خاک درگیر با الیاف به تدریج کاهش می یابد. هنگامی که درصد الیاف کاه در ملات از دو درصد وزنی به چهار درصد می‌رسد، افت شدیدی به میزان ۵۲/۷۱ درصد در مقاومت فشاری ملات مشاهده می‌شود، به‌طوری 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 کاه‌گل، این کاهش، ادامه نیافته و پس از رسیدن درصد کاه به چهار درصد، میزان مقاومت فشاری ملات، تقریبا ثابت باقی می‌ماند و تنها زمانی که میزان الیاف کاه به ۱۵ درصد افزایش می یابد، مجددا شاهد کاهش میزان مقاومت فشاری کاه گل هستیم. علت ثبات مقاومت فشاری، آن است که هنگامی که طول الیاف با اندازه دانه‌ها و اندازه منافذ برابر شود، تأثیر الیاف از بین خواهد رفت؛ زیرا پس از رسیدن میزان الیاف به چهار درصد وزنی، آن چه که مهم و تأثیرگذار است، افزایش درصد الیاف نیست، بلکه از این پس، نسبت طول به عرض الیاف اهمیت دارد. اندازه‌گیری انقباض خطی نمونه‌های کاه‌گل تهیه شده با درصدهای مختلف الیاف کاه نشان داد که با افزایش درصد الیاف در ملات، میزان انقباض و به تبع آن میزان

جدول ۶. نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاه‌گل با افزودنی‌های سیلیکاتی ۱۵۰ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	ضریب نفوذپذیری cm/s	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر به نمونه ۳ درصد
۳ درصد	۱/۰۷ ×۱۰−۶	−۱۰/۸۳	−
۶ درصد	۱/۲۳×۱۰−۶	+۲/۵	+۱۳/۳۳
۳ درصد زئولیت	۱/۴۸×۱۰−۶	+۲۳/۳۳	−
۶ درصد زئولیت	۱×۱۰−۶	−۱۶/۶۶	−۳۹/۹۹
۳ درصد فلدسپات	۴/۹۱×۱۰−۷	−۵۹/۰۸	−
۶ درصد فلدسپات	۷/۰۹×۱۰−۷	−۴۰/۹۱	+۱۸/۱۷
۳ درصد بنتونیت	۱/۱۲×۱۰−۶	−۶/۶۶	−
۶ درصد بنتونیت	۲/۶۶ ×۱۰−۶	+۱۲۱/۶۶	+۱۱۵
۳ درصد کائولن	۴/۲×۱۰−۷	−۶۵	−
۶ درصد کائولن	۲/۱۴ ×۱۰−۷	−۸۲/۱۶	−۱۷/۱۶
کاه‌گل معمولی	۱/۲×۱۰−۶	−	−

ترک‌خوردگی نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد، این یافته با کاهش تعداد ترک‌های سطحی ایجاد شده پس از خشک شدن نمونه‌های کاه‌گل نیز مطابقت دارد. به‌علاوه با افزایش درصد الیاف کاه در نمونه‌ها، وضعیت ظاهری آنها نیز تغییر می‌کند، به‌طوری که با افزایش درصد کاه میزان استحکام و انسجام نمونه‌ها کاهش و سطح آنها به‌تدریج صافی و یکدستی خود را به دلیل افزایش درصد الیاف ازدست داده و ناصاف و زمخت می‌گردد. با توجه به نتایج فوق به‌نظر می‌رسد که مناسب‌ترین میزان الیاف کاه برای تهیه ملات کاه گل با خاک انتخابی، تهیه کاه‌گل با پنج درصد وزنی الیاف کاه می‌باشد که در آن میزان مقاومت فشاری کاه گل در حد قابل‌قبولی است، ضمن آن که میزان انقباض و ترک خوردگی سطح نمونه‌ها نیز اندک است و علاوه بر این، کاه گل از انسجام و استحکام ظاهری خوبی برخوردار بوده و سطح صاف و یکدستی دارد (جدول ۵).

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

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاه‌گل با بار افتان در مقایسه با کاه‌گل معمولی (نمونه کنترل) به شرح مندرج در جداول (۶ و ۷) است: بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری ملات کاه‌گل تهیه شده با مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی و مقایسه آن با کاه‌گل معمولی، نشان داد که مواد افزودنی انتخابی، تأثیر مثبتی در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاه‌گل در مقابل نفوذ آب دارد و با کاهش دانه‌بندی مواد افزودنی از ۱۵۰ به ۴۵ میکرون، تأثیر مثبت این مواد افزودنی در کاهش ضریب نفوذپذیری کاه‌گل افزایش می‌یابد. در این میان زئولیت، فلدسپات، کائولن و بنتونیت تأثیر بیشتری در کاهش ضریب نفوذپذیری کاه‌گل دارند. افزون‌ترین تأثیرگذاری بر کاهش ضریب نفوذپذیری آب با حداقل ماده افزودنی مصرفی، یعنی سه درصد، را در دانه‌بندی ۱۵۰ میکرون در کائولن با ۶۵ دردصد کاهش و در دانه بندی ۴۵ میکرون، در زئولیت با ۸۵/۶۶ درصد کاهش شاهد هستیم و بالاترین میزان کاهش مربوط به استفاده از شش درصد بنتونیت ۱۵۰ میکرون است که موجب کاهش ۱۲۱/۶۶ درصدی در ضریب نفوذپذیری اندود کاه‌گل شده است. طوری که استفاده از سه درصد افزودنی میکرونیزه زئولیت ۴۵ میکرون، ضریب نفوذپذیری اندود کاه‌گل را ۸۵/۶۶ درصد کاهش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج این آزمایش حاکی از آن است که با کاهش ابعاد ماده افزودنی از

جدول ۷. نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاه‌گل با افزودنی‌های سیلیکاتی ۴۵ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	ضریب نفوذپذیری cm/s	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به جدول ۶
۳ درصد میکروسیلیس	۹/۵۸×۱۰-۷	-۲۰/۱۶	-۹/۳۳
۶ درصد میکروسیلیس	۸/۰۳ ×۱۰-۷	-۳۳/۰۸	-۳۵/۵۸
۳ درصد زئولیت	۱/۷۲×۱۰-۷	-۸۵/۶۶	-۱۰۸/۹۹
۶ درصد زئولیت	۱/۷۷ ×۱۰-۷	-۸۵/۲۵	-۶۸/۵۹
۳ درصد فلدسپات	۳/۲۲×۱۰-۷	-۷۳/۱۶	-۱۴/۰۸
۶ درصد فلدسپات	۶/۷۴×۱۰-۷	-۴۳/۸۳	-۲/۹۲
۳ درصد بنتونیت	۴/۷۵ ×۱۰-۷	-۶۰/۴۱	-۵۳/۷۵
۶ درصد بنتونیت	۷/۹۶ ×۱۰-۷	-۳۳/۶۶	+۸۸
۳ درصد کائولن	۳/۴۷ ×۱۰-۷	-۷۱/۰۸	-۶/۰۸
۶ درصد کائولن	۵/۳۸ ×۱۰-۷	-۵۵/۱۶	+۲۷
کاه‌گل معمولی کنترل	۱/۲×۱۰-۶	-	-

۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، تأثیر مواد افزودنی فوق در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاه‌گل افزایش می‌یابد.

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 تأثیر 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 فیزیکی و مکانیکی ملات، به‌ویژه 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 که نتایج آن به شرح مندرج در جداول (۸) تا (۱۱) می‌باشد.

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 بیشتر مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی انتخابی، تأثیر مثبتی در کاهش میزان فرسایش اندود کاه‌گل در مقابل بارندگی به دنبال دارد. بیشترین تأثیر در کاهش میزان فرسایش و هدر رفت ماده جامد بدنه نمونه‌های کاه‌گل در پایین‌ترین غلظت افزودنی با دانه‌بندی ۱۵۰ میکرون در نمونه‌هایی مشاهده می‌شود که با افزودنی میکروسیلیس، فلدسپات و کائولن بهسازی شده‌اند که در این میان، استفاده از سه درصد فلدسپات ۱۵۰ میکرون با ۳۷/۷ درصد کاهش میزان فرسایش آبی بیشترین تأثیر را در کاهش هدر رفت ماده جامد بدنه نمونه‌های کاه‌گل به دنبال داشته است. از سوی دیگر، مطالعات و آزمایشات انجام شده نشان داد که با کاهش ابعاد ماده افزودنی از ۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، تأثیر مثبت به‌کارگیری مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی در کاهش میزان فرسایش تحت بارندگی مصنوعی افزایش می‌یابد، به‌طوری که نمونه ملات‌های بهسازی شده با سه درصد افزودنی ۴۵ میکرون در مقایسه با نمونه‌های اصلاح شده با سه درصد افزودنی ۱۵۰ میکرون کاهش قابل ملاحظه‌ای را در میزان فرسایش آبی نشان می‌دهد. در این میان استفاده از سه درصد افزودنی سیلیکاتی ۴۵ میکرون زئولیت و کائولن به ترتیب با ۳۴ و ۳۱/۴ درصد بالاترین تأثیر را در میان سایر مواد افزودنی این گروه در کاهش میزان هدر رفت ماده جامد و

جدول ۸. نتایج تعیین درصد هدر رفت بدنه نمونه‌های کاه‌گل تهیه شده با افزودنی‌های سیلیکاتی ۱۵۰ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	درصد هدر رفت بدنه نمونه	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه‌های ۳ درصد
۳ درصد میکروسیلیس	۴/۶۵	−۱۱/۴۲	−
۶ درصد میکروسیلیس	۴/۹۵	−۵/۷۱	+۵/۷۱
۳ درصد زئولیت	۶/۷	+۲۷/۶۱	−
۶ درصد زئولیت	۴/۷۸	−۸/۹۵	−۳۶/۵۶
۳ درصد فلدسپات	۳/۲۷	−۳۷/۷۱	−
۶ درصد فلدسپات	۳/۱۴	−۴۰/۱۹	−۲/۴۸
۳ درصد بنتونیت	۵/۷۳	+۹/۱۴	−
۶ درصد بنتونیت	۴/۵۱	−۱۴/۰۹	−۲۳/۲۳
۳ درصد کائولن	۴/۳۷	−۱۶/۷۶	−
۶ درصد کائولن	۴/۹۲	−۶/۲۸	+۱۰/۴۸
کاه‌گل معمولی کنترل	۵/۲۵	−	−

جدول ۹. نتایج اندازه‌گیری عمق نفوذ باران در سطح نمونه‌های کاه‌گل تهیه شده با افزودنی‌های سیلیکاتی ۱۵۰ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	عمق نفوذ باران به میلی‌متر	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه های ۳ درصد
۳ درصد میکروسیلیس	۱۱/۶۱	−۶/۰۶	−
۶ درصد میکروسیلیس	۱۲/۴	+۰/۳۲	+۶/۳۸
۳ درصد زئولیت	۱۵/۴۵	+۲۵	−
۶ درصد زئولیت	۱۱/۳۴	−۸/۲۵	−۳۳/۲۵
۳ درصد فلدسپات	۸/۱۲	−۳۴/۳۰	−
۶ درصد فلدسپات	۱۰/۰۴	−۱۸/۷۷	+۱۵/۵۳
۳ درصد بنتونیت	۱۳/۶۵	+۱۰/۴۳	−
۶ درصد بنتونیت	۸/۳۱	−۳۲/۷۶	−۴۳/۱۹
۳ درصد کائولن	۱۰/۲۳	+۱۷/۲۳	−
۶ درصد کائولن	۱۰/۷۳	−۱۳/۱۸	+۴/۰۵
کاه‌گل معمولی کنترل	۱۲/۳۶	−	−

فرسایش آبی نمونه‌ها داشته است. از سوی دیگر، نتایج آزمایشات بیانگر آن است که افزایش درصد ماده افزودنی از سه به شش درصد، تأثیر چشمگیری در کاهش میزان فرسایش اندود کاه‌گل تحت بارندگی بدنبال ندارد. علاوه بر این، مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان هدر رفت ماده جامد بدنه نمونه‌های کاه‌گل مورد آزمایش تحت بارندگی مصنوعی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق نفوذ قطرات باران در سطح بدنه نمونه‌های ملات حاکی از آن است که نتایج و داده‌های به‌دست آمده در این دو بخش انطباق خوبی با یکدیگر داشته و موید یکدیگرند، به‌طوری که با کاهش میزان فرسایش بدنه نمونه‌های کاه‌گل تحت بارش، میزان نفوذ باران به بدنه نمونه‌ها نیز به شدت کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده در این پژوهش نشان داد که می‌توان با

جدول ۱۰. نتایج تعیین درصد هدر رفت بدنه نمونه‌های کاه‌گل تهیه شده با افزودنی‌های سیلیکاتی ۴۵ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	درصد هدر رفت بدنه نمونه	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه‌های جدول ۸
۳ درصد میکروسیلیس	۴/۴۲	−۱۵/۸۰	−۴/۳۸
۶ درصد میکروسیلیس	۴/۶۷	−۱۱/۰۴	−۵/۳۳
۳ درصد زئولیت	۳/۴۶	−۳۴/۰۹	−۶۱/۷
۶ درصد زئولیت	۳/۸۳	−۲۷/۰۴	−۱۸/۰۹
۳ درصد فلدسپات	۴/۷	−۱۰/۴۷	+۲۷/۲۴
۶ درصد فلدسپات	۶/۹۴	+۳۲/۱۹	+۷۲/۳۸
۳ درصد بنتونیت	۴/۰۵	+۲۲/۸۵	−۳۱/۹۹
۶ درصد بنتونیت	۴/۶۱	−۱۲/۱۹	+۱/۹
۳ درصد کائولن	۳/۶۰	−۳۱/۴۲	−۱۴/۶۶
۶ درصد کائولن	۴/۷۹	−۸/۷۶	−۲/۴۸
کاه‌گل معمولی کنترل	۵/۲۵	−	−

جدول ۱۱. نتایج اندازه‌گیری عمق نفوذ باران در سطح نمونه‌های کاه‌گل تهیه شده با افزودنی‌های سیلیکاتی ۴۵ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	عمق نفوذ باران به میلی‌متر	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه های جدول ۹
۳ درصد میکروسیلیس	۸/۶۶	−۲۹/۹۳	+۲۸/۱۹
۶ درصد میکروسیلیس	۸/۷۷	−۲۹/۰۴	−۲۹/۳۶
۳ درصد زئولیت	۹/۹۴	−۱۹/۵۷	+۵۷/۸۱
۶ درصد زئولیت	۹/۶۹	−۲۱/۶۰	−۱۳/۳۵
۳ درصد فلدسپات	۱۲/۵۱	+۱/۲۱	−۱۷/۰۵
۶ درصد فلدسپات	۱۶/۳۲	+۳۲/۰۳	+۵۰/۸
۳ درصد بنتونیت	۹/۴	−۲۳/۹۴	+۷۲/۹۳
۶ درصد بنتونیت	۱۰/۱۷	−۱۷/۷۱	+۱۵/۰۵
۳ درصد کائولن	۹/۸۵	+۲۰/۳۰	−۱۰/۶۲
۶ درصد کائولن	۱۲/۴۵	+۰/۷۲	+۱۳/۹
کاه‌گل معمولی کنترل	۱۲/۳۶	−	−

استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی مناسب، ضریب نفوذپذیری اندود کاه‌گل را به‌طور چشمگیری کاهش داد. از سوی دیگر، با کاهش اندازه و دانه‌بندی ماده افزودنی در مقیاس میکرونیزه، از ۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، به دلیل افزایش سطح ویژه مواد افزودنی تأثیر مواد افزودنی فوق در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاه‌گل افزایش می‌یابد، به گونه ای که آزمایشات انجام شده نشان دهنده تفاوت و تأثیر چشمگیر نتایج نمونه‌های بهسازی شده با سه درصد ماده افزودنی سیلیکاتی ۴۵ میکرون نسبت به نمونه‌های مشابه (نمونه‌های اصلاح شده با سه درصد افزودنی ۱۵۰ میکرون) و در قیاس با نمونه‌های شاهد و کنترل است.

علاوه بر این مطالعات انجام شده در این پژوهش نشان داد

که افزایش درصد ماده افزودنی، تأثیر چندانی در ادامه روند کاهش نفوذپذیری اندود کاه‌گل نداشته و به‌نظر می‌رسد که درصد بهینه استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی برای کاهش نفوذپذیری کاه‌گل سه درصد وزنی است. مطالعات انجام شده در این بخش، حاکی از آن است که چون خاصیت عایق‌بندی مصالح ساختمانی در مقابل رطوبت به تعبیری عکس حالت نفوذپذیری است، می‌توان با استفاده از آزمون استاندارد اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری، وضعیت عایق‌بندی، مصالح خاکی همچون خشت و کاه‌گل را مورد سنجش و ارزیابی قرار داد. بدین ترتیب، استفاده از آزمون تعیین ضریب نفوذپذیری اندود کاه‌گل با بار افتان برای اولین بار در این پژوهش، نشان داد که این روش آزمایشگاهی استاندارد، به نحو مطلوبی قابلیت ارزیابی مهمترین کارکرد اندود سنتی کاه‌گل، یعنی خاصیت عایق‌بندی آن را دارا می‌باشد. در واقع، استفاده از این آزمون استاندارد گامی هرچند کوچک برای نزدیک شدن روش‌های تجربی نیمه کمی مورد استفاده در ارزیابی مصالح خاکی سنتی مورد استفاده در معماری و حفاظت و مرمت بناهای تاریخی خشت و گلی به استانداردهای ملی و بین‌المللی رایج، مانند سایر مصالح ساختمانی است.

بررسی‌های انجام شده برروی ویژگی مهم دیگر اندود کاه‌گل، یعنی دوام آن در مقابل رطوبت و بارندگی که دشمن اصلی مواد و مصالح خاکی است، با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران، بیانگر ان بود که استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی در بهسازی مصالح خاکی، همچون کاه‌گل، نقش مؤثری در بهبود دوام و ماندگاری این مصالح آسیب‌پذیر در مقابل بارندگی دارد. از سوی دیگر، نتایج به‌دست آمده در این بخش، انطباق خوبی با نتایج حاصل از آزمایشات تعیین ضریب نفوذپذیری کاه‌گل دارد، به‌طوری که حداکثر دوام در مقابل فرسایش ناشی از بارش مصنوعی تحت باران‌ساز در نمونه‌هایی مشاهده می‌شود که میزان کاهش ضریب نفوذپذیری آنها نسبت به نمونه‌های شاهد کمتر یوده است، یعنی نمونه‌های بهسازی شده با میکروسیلیس، زئولیت، فلدسپات و کائولن. به علاوه نتایج آزمایشات در این بخش نشان داد که با کاهش میزان هدر رفت ماده جامد بدنه نمونه‌های اندود بهسازی شده در مقابل بارندگی و افزایش دوام اندود، میزان نفوذ قطرات باران نیز در سطح نمونه‌های کاه‌گل به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

در یک جمع بندی کلی از نتایج و دستاوردهای به‌دست آمده از این پژوهش، می‌توان گفت:

۱. استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی مناسب، تأثیر چشمگیری در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود سنتی کاه‌گل در مقابل نفوذ آب و به تبع آن، بهبود خاصیت عایق‌بندی آن در مقابل رطوبت بدنبال دارد.

۲. به‌کارگیری مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی، علاوه بر بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاه‌گل، دوام و مقاومت اندود را نیز در مقابل فرسایش ناشی از رطوبت و بارندگی به نحو مطلوبی افزایش داده و موجب ماندگاری و طول عمر بیشتر اندود کاه‌گل می‌گردد.

۳. با استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی در بهسازی مصالح سنتی مورد استفاده در معماری و حفاظت و مرمت بناهای خشت و گلی، می‌توان هزینه‌های سالیانه ساخت و ساز و تعمیر و نگهداری این آثار را تا حد زیادی کاهش داد.

۴. با کاهش ابعاد ذرات ماده افزودنی مورد استفاده از ۱۵۰ به ۴۵ میکرون، میزان تأثیر مواد افزودنی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاه‌گل به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد.

۵. درصد بهینه استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاه‌گل، سه درصد وزنی است.

۶. افزایش میزان استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی، تأثیر چندانی در افزایش روند بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاه‌گل ندارد.

منابع مورد استفاده

۱. افتخاریان، ل.، ا. تی تی دژ، ر. مهین روستا، ب. خاکباز، ا. سارنگ.،م. نواری و پ. صادقیان. ۱۳۹۰. *آزمایشگاه مکانیک خاک*، چاپ دوم، نشر کتاب دانشگاهی، تهران.

۲. حجازی. م.، م. هاشمی، ا. جمالی‌نیا و م. باتوانی. ۱۳۹۳. تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته شده از خاک اصفهان، فصلنامه مسکن و محیط روستا ۳۲(۱۵۱): ۸۰-۶۷.

۳. داس، ب. ا. ۱۳۹۱. *اصول مهندسی ژئوتکنیک مکانیک خاک*، چاپ اول، نشر کتاب دانشگاهی، تهران.

۴. شاه نظری، م. ر و م. ق. سحاب. ۱۳۹۳. *دستور العمل های آزمایشگاه بتن*، چاپ دوازدهم، نشر علم و صنعت، تهران.

5. Anupam, A. K and P. Kumar. 2013. Use of various vgricultural and industrial waste materials in road construction, Proc-Soci. Beha. Sci. 104: 264-273.
6. Bharath, B., M. Reddy, J. Pathan and R. Patel. 2014. Studies on stabilised adobe blocks, I. J. Resea EngTechno. 3(6): 259-64.
7. Calatan. G., A. Hegyi, C. Dico and C. Mircea. 2016. Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks, Proce. Technol. 22: 259-265.
8. Corrêa. A. A. R., L. M. Mendes, N. P. Barbosa, T. de Paula Protásio, N. de Aguiar Campos and G. H. D. Tonoli. 2015. Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes, Constr. Buil. Mate. 98: 250-256.
9. Eires, R., A. Camões and S. Jalali. 2013. Earth architecture: ancient and new methods for durability improvement, ICSA2013-2nd International Conference on Structures and Architecture, 24-26 July, Guimaraes, Portugal.
10. El-Mahllawy, M. S and A. M. Kandeel. 2014. Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks, HBRC J. 10(1): 82-91.
11. Georgiev, G., W. Theuerkorn, M. Krus, R. Kilian and T. Grosskinsky. 2014. The potential role of cattail-reinforced clay plaster in sustainable building, Mires Peat 13: 1-13.
12. Germaine, J. T., A. V.Germaine. 2009. Geotechnical laboratory measurements for engineers. John Wiley & Sons.
13. Maheri, M. R., A. Maheri, S. Pourfallah, R. Azarm and A. Hadjipour. 2011. Improving the durability of straw-reinforced clay plaster cladding for earthen buildings. I. J. Architectural Heritage 5(3): 349-366.
14. Miqueleiz, L., F. Ramirez., J. E. Oti., A. Seco., J.M. Kinuthia., I. Oreja and P. Urmeneta. 2013. Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production, Eng. Geology 163: 68-74.
15. Nwankwor, N. A. 2011. Justification for the combination of organic and inorganic stabilizers to stabilize traditional earth materials (mud) for quality and capacity utilization in africa. Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage, 1-5 February, Mali.
16. Sharma. V., H. K. Vinayak and B.M. Marwaha. 2015. Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement, I. J. Sustainable Built Environment 4(2): 348-358.
17. Standard, B. 2000. 1377: Part 2 1990. Soil testing mechanics, laboratory testing manual.
18. Trivedi, J. S., S. Nair and C. Iyyunni. 2013. Optimum utilization of fly ash for stabilization of sub-grade soil using genetic algorithm, Procedia Eng. 51: 250-258.
19. Zhang. J., W. Chen, Z. Li, X. Wang, Q. Guo and N. Wang. 2015. Study on workability and durability of calcined ginger nuts-based grouts used in anchoring conservation of earthen sites, J. Cultural Heritag 16: 831-837.

J. Water and Soil Sci (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.)
Vol. 21, No. 1, Spring 2017, Isf. Univ. Technol., Isf., Iran.

The Effect of Silicates Micronized Additives on Reduction of Permeability and Erosion due to Artificial Rainfall of Kahgel Plaster

M. Bater[*1,2], H. Ahmadi[2] and R. Emadi[3]

(Received: Nov. 13-2016 ; Accepted: Jan. 25-2017)

Abstract

Kahgel is one of the oldest traditional mortars in Iran capabilities and performance of which in the past to conserve earthen buildings show that it can be used as a covering for conservation and preservation of earthen architectural structures. The ancient waterproof covering is very efficient at keeping the building dry during the heavy rain showers, but low durability and the need for renewal the plaster due to erosion of rainfall suggest that Kahgel plaster is weak and unstable. So, it is very essential and necessary to find appropriate scientific methods to enhance durability and lifespan of Kahgel plaster. In this research, the effect of silicates micronized additives (including Microsilica, Feldspar, Zeolite, Bentonite and Kaolin) on the stabilization and improvement of the physical and mechanical properties of Kahgel plaster with experimental study by hydraulic conductivity and water erosion Kahgel plaster indicated that using the micronized silicates additives can significantly improve physical and mechanical properties of earth and earthen materials such as Kahgel. Experimental results showed that application of Kaolin 150 microns at 3 wt% (by weight of Kahgel) reduced hydraulic conductivity of the Kahgel plaster at 65% level and Zeolite 45 microns at 3 wt% (by weight of Kahgel) decreased by 85%. In addition evaluation of water erosion of the samples during rainfall by rainfall simulator showed that use of 3 wt% micronized Microsilica, Feldspar, Zeolite and Kaolin decreased sample's total dry material loss of the Kahgel plaster at least10/5% and maximum up to 37/7% and increased their durability against erosion from rainfall. In addition, results from studies indicate that by reducing the particle size of the additive, their positive effect on physical and mechanical properties of Kahgel mortar increases. On the other hand, 3 wt% is the optimized percentage of micronized silicate additives to improve Kahgel coating and increased amount of additives seems to have no significant impact on the improvement of physical and mechanical properties.

Keywords: Earthen architecture, Kahgel, micronized additives, Silicates, Conservation

1. Dept. of Conservation and Restoration of Cultural Properties, Faculty of Arts and Architecture, Zabol Univ., Zabol, Iran.
2. Dept. of Conservation and Restoration of Cultural Properties, Faculty of Preservation and Restoration, Art Univ.of Isfahan, Isfahan, Iran.
3. Dept. of Materials Eng., Faculty of Materials Eng., Isf. Univ.of Technol., Isfahan, Iran.
*: Corresponding Author, Email: masoud.bater@gmail.com