بررسی تاثیر استفاده از افزودنی‌های میکرونیزه تکتوسیلیکاتی بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود سنتی کاهگل

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

۱- مربی دانشکده هنر و معماری، دانشگاه زابل، زابل، ایران و دانشجوی دکتری مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

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 مواد افزودنی مختلف تکتوسیلیکاتی میکرونیزه در ترکیب با ملات کاهگل به منظور افزایش دوام آن نشان داد که با استفاده از ۳ درصد افزودنی تکتوسیلیکاتی ۴۵ میکرون میکروسیلیس تا ۲۰ درصد، با زئولیت تا ۸۵/۶ درصد و با فلدسپات میکرونیزه تا ۷۳ درصد می‌توان ضریب نفوذپذیری کاهگل را کاهش داد. به علاوه، افزودن ۳ درصد وزنی میکروسیلیس، زئولیت و فلدسپات میکرونیزه ۴۵ میکرون، مقاومت فشاری کاهگل را نیز نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب تا ۷۳/۵، ۳۶ و ۷۱/۵ درصد ارتقاء می‌دهد. از سوی دیگر، ارزیابی میزان دوام نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارش مصنوعی با دستگاه شبیه‌ساز باران نشان داد که استفاده از ۳ درصد وزنی میکروسیلیس، زئولیت و فلدسپات، میزان هدر رفت ماده جامد در نمونه‌ها را به ترتیب تا ۱۵/۸، ۳۴ و ۱۰/۵ درصد کاهش و دوام آنها را در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی افزایش می‌دهد. این مطالعات بیانگر آن است که با کاهش اندازه ذرات و دانه‌بندی ماده افزودنی، میزان تاثیر مثبت آنها نیز در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل افزایش می‌یابد. این مطالعات همچنین نشان داد که درصد بهینه استفاده از مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی میکرونیزه برای بهسازی اندود کاهگل ۳ درصد وزنی است و افزایش میزان ماده افزودنی، تاثیر چندانی در ادامه روند بهسازی خواص فیزیکی و مکانیکی کاهگل ندارد.

کلمات کلیدی: معماری خاکی، کاهگل، مواد افزودنی میکرونیزه، تکتوسیلیکات‌ها ، حفاظت.

[*]نویسنده مسئول: مسعود باتر

پست الکترونیکی: masoud.bater@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۰

شناسه دیجیتال DOI: 10.22065/jsce.2017.43832

http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.43832

۱- مقدمه

استفاده از مصالح خشت و گلی، سابقه‌ای بس دیرینه در تاریخ تمدن بشر دارد [۱]. بسیاری از فرهنگها و تمدنهای مختلف در سراسر جهان، شهرهای خود را از خشت خام ساخته‌اند که امروزه آثار و بقایای باستان‌شناختی آنها در نقاط مختلف جهان به جای مانده است [۲]. خاک در دسترس‌ترین و ارزان‌ترین مصالح ساختمانی است که در تمام دنیا به وفور یافت می‌شود و از طرفی، توانایی سازگاری با اقلیم‌های مختلف را نیز دارا است و هنوز هم در کشورهای در حال توسعه، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳-۵]. تقریبا در تمام اقلیمهای گرم و خشک و معتدل جهان خاک رایج‌ترین مصالح ساختمانی است [۶]. این سنت دیرپا، تداوم شگفت انگیزی نیز داشته است؛ به طوری که برآورد می‌شود، حدود ۳۰ درصد از جمعیت جهان؛ یعنی تقریبا ۱/۷-۱/۵ میلیارد نفر در خانه‌های ساخته شده از مصالح خشت و گلی زندگی می‌کنند [۶-۱۲] و [۲].

بر طبق آمار منتشر شده از سوی سازمان بین‌المللی یونسکو، ۱۵-۱۰ درصد از آثار ثبت شده در فهرست میراث جهانی بشر را یادمان‌های معماری خشت و گلی تشکیل می‌دهد؛ این در حالی است که حجم زیادی از میراث خشتی جهان در کشورهای مختلف، در معرض خطر می‌باشد، به طوری که بر اساس آمار موجود، حدود ۵۷ درصد از این محوطه‌ها در فهرست آثار درحال خطر یونسکو قرار دارند [۱۴-۱۳] و [۸].

کاهگل یکی از قدیمی‌ترین مصالح خاکی و ملاتهای گلی است که در نخستین ساختمانهایی که بشر بنا نموده، به‌کار رفته است. در ایران نیز استفاده از اندود کاهگل، یکی از ویژگیها و مشخصات مهم میراث معماری خاکی در مناطق گرم و خشک 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 ۵-۳ سانتیمتر در سطح خارجی بنا، خاصیت عایق حرارتی نیز دارد [۱۵].

قابلیتها و ویژگی‌های مهم حفاظتی اندود کاهگل از جمله: سهولت کاربرد آن در ابنیه و بافت تاریخی، در دسترس بودن، صرفه اقتصادی، قابلیت بازگشت به طبیعت و همخوانی با ساختار ابنیه خشت و گلی موجب شده است که از این اندود سنتی به عنوان یک پوشش حفاظتی در بسیاری از بناهای تاریخی و محوطه‌های باستانی استفاده شود، به گونه‌ای که کاربرد وسیع و گسترده آن را در بسیاری ار ابنیه تاریخی و محوطه‌های باستانی مهم، از جمله: شوش، چغازنبیل، هفت تپه، شهر سوخته، کوه خواجه، ارگ بم و بافت تاریخی شهرهایی همچون یزد، اصفهان، کرمان و کاشان مشاهده می‌کنیم.

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 به‌کارگیری 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 می‌شود 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 ۲-۱ سال، بایستی این اندود تجدید شود؛ در واقع، 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 و مصالح خاکی، 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 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، لزوم مطالعه برای یافتن راه حلهای علمی مناسب به منظور افزایش دوام و طول عمر مفید اندود کاهگل بسیار لازم و ضروری به نظر می‌رسد، بنابراین توجه به این ملات سنتی کهن و تلاش برای احیاء آن از اهمیت بسیاری برخوردار است.

هر چند موضوع تثبیت و بهبود خواص خاک و مصالح خاکی پیشینه‌ی بس دیرینه‌ای دارد و از عصر باستان، استفاده از مواد افزودنی طبیعی، همچون: الیاف کاه، موی بز و ذرات شن و ماسه برای اصلاح مصالحی، نظیر خشت و گل، همواره مورد توجه بشر بوده است ولی سابقه پژوهش‌های علمی در این زمینه، به حدود سال ۱۹۲۰ میلادی باز می‌گردد که مواد تثبیت‌کننده خاک، بطور علمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از اتمام جنگ جهانی دوم، در سال ۱۹۴۵ میلادی، نیز به دلیل خرابیها و ویرانی‌های ناشی از جنگ و شروع عملیات بازسازی و نوسازی شهرهای آسیب دیده اروپایی در طی جنگ و نیاز شدید و فوری به ساخت مسکن و سرپناه برای هزاران بی‌خانمان، در طی سه دهه مطالعات بسیار گسترده و دامنه‌داری در این زمینه انجام شد و بدنبال آن فنون ساخت و ساز با مصالح خاکی توسعه بسیاری یافت [۷ و۲]. با این وجود، بیشتر این مطالعات در آغاز، با هدف بهینه‌سازی خاک از دیدگاه مهندسی راه و ساختمان، برای بهبود زیرسازی جاده‌ها و تثبیت خاک آنها برای عبور و مرور وسایط نقلیه و خودروها و همچنین احداث سدهای خاکی، پوشش کانالها و غیره بود ولی به تدریج این پژوهش‌ها، در ارتباط با تثبیت خاک با استفاده از مواد افزودنی مختلف، در سایر حوزه‌ها، از جمله: معماری و مرمت نیز مورد توجه قرار گرفت و دنبال شد.

ماهری و همکارانش در تحقیقی نشان دادند که افزودن ۱۰ درصد آهک شکفته به همراه ۱۰ درصد پودر سنگ به اندود کاهگل تهیه شده با ۲ درصد کاه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دوام کاهگل را در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی به طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۱۵]. مطالعات آزمایشگاهی نوانکوار در آفریقا، گویای آن است که افزودن ترکیبی از ۳۰ درصد خاکستر پوسته برنج، ۲/۵ درصد سیمان و ۲/۵ درصد آهک به بلوک‌های گل فشرده، مقاومت فشاری و دوام آنها را در مقابل فرسایش آبی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است [۱۶]. رحیم‌نیا و حیدری در پژوهشی بر روی بررسی میزان تاثیر دامنه خمیری خاک بر بهبود مقاومت فشاری و کششی خشت‌های تثبیت شده با سیمان به منظور استفاده از آنها در مرمت، نشان دادند که در تثبیت خاک و مصالح خاکی، توجه به دامنه خمیری خاک و نقش موثر آن در بهبود مقاومت فشاری و کششی این مصالح، از اهمیت بسزایی برخوردار است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که هرچه دامنه خمیری خاک تثبیت شده با سیمان بیشتر باشد، به همان نسبت، میزان تاثیرگذاری سیمان در بهبود مقاومت خاک نیز افزایش خواهد یافت؛ بر اساس این مطالعات، روشن شده است که افزودن ۱۰ درصد سیمان به ترکیب خاک برای تثبیت آن به منظور تهیه خشت، علاوه بر ارتقاء مقاومت فشاری آن، مقاومت کششی خشت را نیز، حدود ۸-۳ برابر افزایش می‌دهد [۱۷]. آلاوز رامیرز و همکارانش در تحقیقی دریافتند که با افزودن مخلوطی از ۱۰ درصد آهک و ۱۰ 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 [۱۸]. میکلیز و همکاران در سال ۲۰۱۳ 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 [۱۹]. تحقیق اریس و همکارانش در سال ۲۰۱۳ میلادی در زمینه 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 بطور 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، به علاوه استفاده از این مواد افزودنی به طور قابل توجهی عملکرد و تاثیر آهک را در بهبود خواص مصالح ارتقاء می‌دهد [۲۰]. استفاده از خاکستر بادی برای تثبیت خاک توسط تیرودی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ میلادی نشان داد که این ماده افزودنی ضایعاتی، علاوه بر قابلیت تثبیت، ظرفیت باربری خاک را نیز ارتقاء می‌دهد [۲۱]. 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 ۲۰۱۳ میلادی، نشان داد که استفاده از این مواد، ضمن تثبیت خاک سبب ارتقاء چشمگیر ظرفیت باربری خاک می‌گردد [۲۲]. المهلاوی و کندل در سال ۲۰۱۴ میلادی در مصر با تهیه خشت با استفاده از رس مونتموریلونیتی و تثبیت آن با ۳۰ درصد آهک و ۱۵ 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 [۲۳]. جورجیو و همکارانش در سال ۲۰۱۴ میلادی 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 [۲۴]. پژوهش حجازی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی 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 [۲۵]. مطالعات ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی در مورد تاثیر استفاده از افزودنی‌های مختلف، از جمله: 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 آن را نیز در مقابل فرسایش بهبود می‌بخشد [۲۶]. بررسی تاثیر استفاده از بزاق مصنوعی موریانه[1] و ذرات بامبو در تهیه با خشت توسط کوریا و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی نشان داد که با این مواد افزودنی انقباض خطی، درصد جذب آب و میزان فرسایش آبی در خشت‌ها کاهش یافته و افزودن ۶ درصد ذرات بامبو به خشت مقاومت فشاری آن را تا ۹۰ درصد ارتقاء می‌دهد [۲۷]. پژوهش شرما و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی به منظور افزایش دوام خانه‌های روستایی ساخته شده از خشت و گل در هندوستان با استفاده از الیاف گیاهان بومی منطقه حاکی از آن بود که استفاده از الیاف گیاهی بدست آمده از گیاهان بومی منطقه همیرپور در شمال ایالت هیماچال پرادش هندوستان، شامل الیاف کاج راکسبرگ[2] بومی هیمالیا و الیاف گیاه بومی اپتیوا[3] 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 گردید [۲۸]. بررسی تاثیر استفاده از الیاف کنف در ترکیب خشت توسط کالاتان و همکارانش در سال ۲۰۱۶ میلادی، بیانگر آن بود که استفاده از الیاف گیاهی کنف به میزان بهینه ۱۰-۹ درصد در ترکیب با خشت، ضمن کنترل انقباض و جلوگیری از ترک خوردن آن، موجب افزایش استحکام، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی خشت می‌شود [۲۹].

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 متمرکز بوده و بخش اعظم این تحقیقات، با هدف ارتقاء و افزایش مقاومت مکانیکی و توانبخشی این مصالح انجام شده است ولی به بهبود خواص و بهینه‌سازی اندودهای گلی و نقش حفاظتی آنها در بناهای تاریخی خشت و گلی، کمتر توجه شده 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 خاک و مصالح خاکی به منظور به‌کارگیری آنها در معماری و 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 و آنچه که در این میان از آن غفلت شده است، اهمیت

1 Synthetic termite saliva
2 Roxburghii
3 Optiva

فوق العاده ابعاد و اندازه ذرات ماده افزودنی به‌کار رفته در بهبود خواص خاک و مصالح خاکی است، بطوری که کمتر پژوهشی را می‌توان یافت که در آن، به نقش اندازه ذرات ماده افزودنی در ارتقاء خواص مصالح خاکی، توجه شده 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 کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری بنا به تدریج عایق‌های دیگر، همچون قیر جایگزین اندود سنتی کاهگل شود [۱۶]، بدیهی است که با بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود 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. از سوی دیگر، با وجود آن که یکی مهمترین کارکردهای اندود کاهگل در معماری و مرمت، نقش حفاظتی آن برای عایق‌بندی بنا و محافظت از ساختارهای آسیب‌پذیر خشت و گلی، در مقابل رطوبت و بارندگی و فرسایش ناشی از آن می‌باشد ولی تا کنون، به طور تخصصی، تحقیق و پژوهشی همه جانبه در مورد بهبود و ارتقاء این خاصیت مهم کاهگل به عنوان یکی از مهمترین مصالح و اندودهای سنتی ایرانی که کارکرد حفاظتی نیز دارد، انجام نشده است.

۲- مواد و روشها

این تحقیق به روش تجربی، با مطالعات آزمایشگاهی بر روی ملات کاهگل به منظور بهبود خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی آن با استفاده از مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی میکرونیزه انجام شده است. برای این منظور پس از تهیه خاک مناسب، نمونه‌های مختلفی از ملات کاهگل با درصدهای مختلف الیاف کاه گندم تهیه شد و سپس با اندازه‌گیری مقاومت فشاری، درصد انقباض خطی و میزان ترکهای سطحی آنها با روشهای آزمایشگاهی استاندارد، مناسب‌ترین ترکیب کاهگل از نظر میزان الیاف کاه برای انجام مراحل بعدی آزمایش انتخاب شد. در مرحله بعد، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد مطالعه در نمونه کاهگل بدون ماده افزودنی به عنوان گروه آزمایشی شاهد و کنترل مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت و سپس تاثیر استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه تکتوسیلیکانی مختلف با دانه‌بندی متفاوت بر روی همان خواص فیزیکی و مکانیکی در ملات کاهگل جدید اندازه‌گیری و در پایان، نتایج حاصل با نمونه‌های ملات کاهگل کنترل مقایسه شد. در تمامی مراحل نمونه‌سازی و مطالعات آزمایشگاهی، ترکیب ملات کاهگل از نظر، نوع خاک، بافت خاک، دانه‌بندی خاک، نوع الیاف، میزان الیاف، نحوه تهیه، شیوه عمل‌آوری و مدت زمان عمل‌آوری، ثابت در نظر گرفته شد و نوع و ابعاد ذرات ماده افزودنی به عنوان متغیر مستقل تحقیق، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. 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، انقباض خطی و ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها تهیه شد:

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	ASTM C109-90	مکعبی ۵×۵×۵
درصد انقباض خطی کاهگل	استفاده از قالب و آون	BS 1377- Part 2	نیم استوانه‌ای به طول ۱۴
تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان	استفاده از نفوذسنج	D2434-68 ASTM	استوانه‌ای، ارتفاع ۳/۵ و قطر ۵
تعیین میزان دوام در مقابل بارندگی	استفاده از دستگاه شبیه ساز باران		مکعب مستطیل ۳×۱۰×۱۰

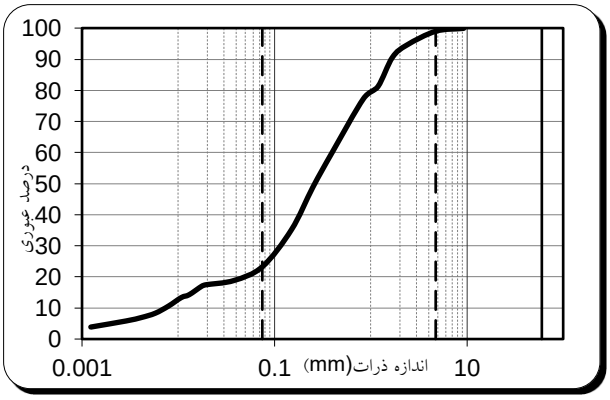
یکی از مهمترین مشکلات و موانع این پژوهش، عدم وجود روش‌های آزمایشگاهی استاندارد برای ارزیابی مصالح خاکی، به ویژه کاهگل بود؛ یعنی آزمون‌های استانداردی که با ویژگی‌ها و محدودیتهای خاص این دسته از مصالح، تناسب و همخوانی داشته باشد، بنابراین در این تحقیق از روش‌های آزمایشگاهی استاندارد مرسوم برای ارزیابی مصالح ساختمانی مشابه، برای سنجش خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل استفاده شد، چون یکی از دغدغه‌های مهم این پژوهش، تلاش برای دستیابی به استانداردهای لازم برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی به ویژه کاهگل بود.

۲-۱-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، حدود اتربرگ، چگالی ویژه، pH، هدایت الکتریکی و درصد انقباض خطی آن، با روشهای استاندارد مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفت (شکل ۱ و جداول ۳-۲)که نتایج آن، بدین شرح می باشد:

مهیار جدول ۲: نتایج آزمایش دانه‌بندی نمونه خاک دشت

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
C_C	۴/۲۵
C_U	۵۴/۲۱
طبقه‌بندی خاک آشتو	A-2-4(0)
طبقه‌بندی خاک متحد	SC- Clayey Sand



شکل۱: نمودار دانه‌بندی نمونه خاک انتخابی از دشت مهیار.

جدول۳ : روشهای مطالعه آزمایشگاهی نمونه خاک و نتایج آن

نوع آزمایش	روش	کد استاندارد	نتیجه
حد روانی خاک (LL)	دستگاه کاساگرانده	D4318-98 ASTM	۲۱/۵
حد خمیری خاک (PL)	روش فتیله کردن	D4318-98 ASTM	۱۲/۲
دامنه خمیری خاک (PI)	اختلاف حد روانی و حد خمیری	D4318-98 ASTM	۹/۳
دانه‌بندی خاک	الک و هیدرومتری	D422-87 ASTM	جدول ۳
درصد رطوبت خاک	خشک کردن در آون	D4643-00 ASTM	۲/۳۴
چگالی ویژه خاک	استفاده از پیکنومتر	D854-02 ASTM	۲/۶۹
درصد انقباض خطی خاک	استفاده از قالب و آون	BS 1377- Part 2	۶/۰۹
pH خاک	روش پتانسیومتری	D4972 ASTM	۷/۸۱
درصد مواد آلی خاک	استفاده از کوره	ASTM D2974	۱/۷۱
هدایت الکتریکی خاک	دستگاه هدایت سنج	D4972 ASTM	۱/۱۳

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 رس‌دار طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۳ و شکل ۱). تعیین حدود اتربرگ این نمونه خاک، نشان داد که با توجه به پایین بودن دامنه خمیری آن، این خاک کمتر دچار ترک می‌شود؛ به علاوه، 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 گلی تهیه شده از خاک نیز به همان نسبت کاهش می‌یابد که از این نظر نیز خاک مهیار نمونه 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. 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.

۲-۲- مواد افزودنی

برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل به ویژه خاصیت عایق‌بندی آن که مهمترین ویژگی این ملات و اندود سنتی در بناهای خشت و گلی محسوب می‌شود از مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی میکرونیزه با دانه‌بندی۱۵۰ و ۴۵ میکرون استفاده شد که شامل: میکروسیلیس، زئولیت کلینوپتیلولایت و فلدسپات بود که مشخصات آنها به این شرح است:

جدول۴ : مشخصات مواد افزودنی میکرونیزه مورد استفاده

نام ماده افزودنی	رنگ	شکل	محل تهیه
میکروسیلیس	سفید	پودر جامد	شرکت توما اصفهان
زئولیت	سفید متمایل به سبز	پودر جامد	اصفهان
فلدسپات	سفید	پودر جامد	شرکت توما اصفهان

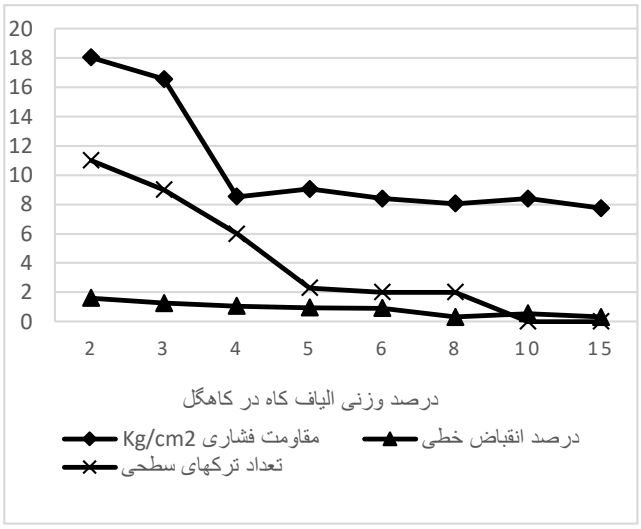
۳- نتایج و بحث

۳-۱- 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، نمونه‌های مختلفی از این ملات با درصدهای مختلف کاه گندم تهیه شد و سپس با استفاده از قالب‌های آزمایشگاهی استاندارد، برای هر آزمون، ۳ نمونه آزمایشگاهی از ملات کاهگل به شرح زیر تهیه گردید: نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد ۳×۱۰×۱۰سانتیمتر 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 قالب‌ها در هریک از نسبت ترکیب‌های انتخابی کنترل شد تا شرایط آزمایشگاهی نمونه‌ها 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 ۷۲ ساعت در سایه، در محیط آزمایشگاه قرار داده شد، تا به آرامی رطوبت سطحی نمونه‌ها کاهش یابد، سپس نمونه‌های کاهگل به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا اندکی 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 به مدت ۱۴ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری شد و پس از رسیدن سن نمونه‌ها به ۱۴روز، 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 ۲ و جدول ۵ می‌باشد.

جدول۵ : 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
CW2h1	۲	۱۸/۰۴	۱/۶	۱۱
CW3h1	۳	۱۶/۵۶	۱/۲۵	۹
CW4h1	۴	۸/۵۳	۱	۶
CW5h1	۵	۹/۰۵	۰/۹۵	۲/۳
CW6h1	۶	۸/۴	۰/۹	۲
CW8h1	۸	۸/۰۶	۰/۳	۲
CW10h1	۱۰	۸/۴	۰/۵۵	صفر
CW15h1	۱۵	۷/۷۵	۰/۳	صفر



شکل۲: نتایج آزمایش نمونه‌های کاهگل با درصدهای مختلف الیاف کاه.

بررسی نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه حاکی از آن است که با افزایش درصد الیاف کاه در ترکیب کاهگل، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز به دلیل کاهش ذرات خاک درگیر با الیاف به تدریج کاهش می‌یابد. هنگامی که درصد الیاف کاه در ملات از ۲ درصد وزنی به ۴ درصد می‌رسد، افت شدیدی به میزان ۵۲/۷۱ 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 ۴ درصد، میزان مقاومت فشاری ملات، تقریبا ثابت باقی می‌ماند و تنها زمانی که میزان الیاف کاه به ۱۵ درصد افزایش می‌یابد، مجددا شاهد کاهش میزان مقاومت فشاری کاهگل هستیم.

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 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 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 ۵ 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 نیز برخوردار بوده و سطح صاف و یکدستی دارد (شکل ۲ و جدول ۵).

پس از تعیین ترکیب و درصد بهینه الیاف گیاهی کاه در ملات کاهگل و اندازه‌گیری خواص مختلف مکانیکی و فیزیکی آن به عنوان نمونه ملات کاهگل شاهد و کنترل؛ یعنی ملات کاهگل تهیه شده با خاک منطقه دشت مهیار اصفهان به همراه ۵ درصد وزنی الیاف کاه و مقدار بهینه آب مقطر با ۷۲ ساعت عمل‌آوری؛ نمونه‌های کاهگل جدید با همین نسبت ترکیب با مواد افزودنی میکرونیزه تکتوسیلیکاتی با دانه‌بندی ۱۵۰ و ۴۵ میکرون به میزان ۳ و ۶ درصد وزنی تهیه و پس از خشک شدن، خواص فیزیکی و مکانیکی آنها پس رسیدن آنها به سن ۱۴ روز اندازه‌گیری شد.

۳-۲- نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان نمونه‌های کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی

چون هدف اصلی این تحقیق، بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل و به تبع آن افزایش دوام و ماندگاری این اندود سنتی در مقابل رطوبت و بارندگی بود، بنابراین، ارزیابی و اندازه‌گیری تغییرات میزان نفوذپذیری و خاصیت عایق‌بندی ملات کاهگل در مقابل آب بسیار

مهم و حیاتی بود و یافتن روشی استاندارد برای این آزمایش از اهمیت بسیاری برخوردار بود. بنابراین در این پژوهش برای اولین بار از آزمون اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری با بار افتان برای این منظور استفاده شد تا قابلیت این روش آزمایشگاهی برای ارزیابی میزان نفوذپذیری و تغییرات خاصیت عایق‌بندی اندود سنتی کاهگل در مقابل رطوبت و بارندگی روشن و مشخص گردد، به همین خاطر تعیین ضریب نفوذپذیری ملات کاهگل، برای ارزیابی میزان تاثیر مواد افزودنی در بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل از اهمیت بسیاری برخوردار بوده و آزمایشی کلیدی در این پژوهش محسوب می‌شد، چون در واقع، عایق‌بندی عکس حالت نفوذپذیری است.

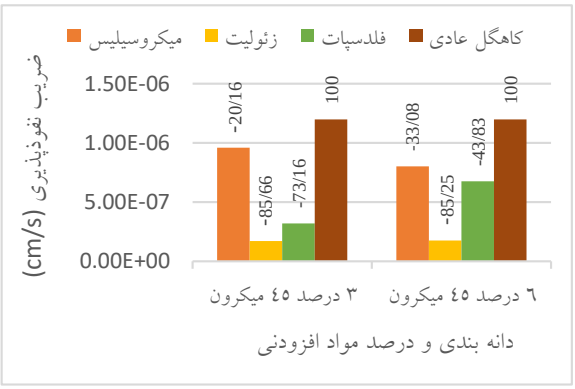
برای این منظور، از هر ترکیب ملات کاهگل، سه نمونه استوانه‌ای به ارتفاع ۳/۵ سانتیمتر و قطر ۵ سانتیمتر تهیه و در داخل سه دستگاه مجزای نفوذسنجی استاندارد قرار داده شد و سپس ضریب نفوذپذیری هریک از نمونه‌ها با بار افتان پس از رسیدن نمونه‌ها به حالت پایداری و تعادل در طول ۷۲ ساعت پس از عمل‌آوری، حداقل ۸۱ نوبت پی در پی اندازه‌گیری شد و بعد میانگین نتایج حاصله به عنوان نتیجه نهایی برای تعیین ضریب نفوذپذیری کاهگل با بار افتان محاسبه و گزارش گردید. در این آزمایش، ابتدا ضریب نفوذپذیری نمونه کاهگل معمولی (کاهگل شاهد بدون ماده افزودنی)، ۳۴۰ نوبت اندازه‌گیری شد و سپس بعد از تهیه نمونه‌های کاهگل جدید با استفاده از مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی میکرونیزه، ضریب نفوذپذیری آنها به روش 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. مطالعات انجام شده در این مرحله و نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌های مختلف به شرح مندرج در جداول ۹-۶ و شکل۳ است:

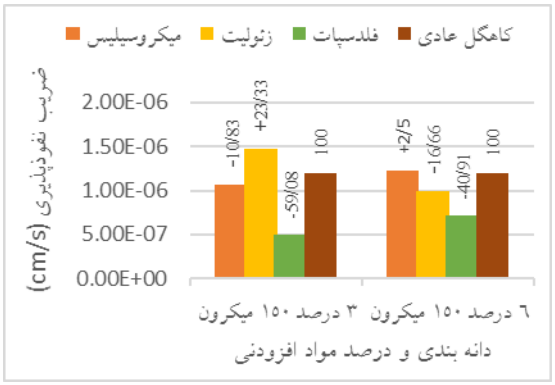
جدول۶ : نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	ضریب نفوذپذیری cm/s	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر به نمونه ۳ درصد
۳ درصد میکروسیلیس	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۶}$	-۱۰/۸۳	-
۶ درصد میکروسیلیس	$۱/۲۳ \times ۱۰^{-۶}$	+۲/۵	+۱۳/۳۳
۳ درصد زئولیت	$۱/۴۸ \times ۱۰^{-۶}$	+۲۳/۳۳	-
۶ درصد زئولیت	۱×۱۰^{-۶}	-۱۶/۶۶	-۳۹/۹۹
۳ درصد فلدسپات	$۴/۹۱ \times ۱۰^{-۷}$	-۵۹/۰۸	-
۶ درصد فلدسپات	$۷/۰۹ \times ۱۰^{-۷}$	-۴۰/۹۱	+۱۸/۱۷
کاهگل معمولی	$۱/۲ \times ۱۰^{-۶}$	-	-

جدول۷ : نتایج تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های کاهگل با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۴۵ میکرون

نام ماده افزودنی و دانه بندی	ضریب نفوذپذیری cm/s	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به جدول ۶
۳ درصد میکروسیلیس	$۹/۵۸ \times ۱۰^{-۷}$	-۲۰/۱۶	-۹/۳۳
۶ درصد میکروسیلیس	$۸/۰۳ \times ۱۰^{-۷}$	-۳۳/۰۸	-۳۵/۵۸
۳ درصد زئولیت	$۱/۷۲ \times ۱۰^{-۷}$	-۸۵/۶۶	-۱۰۸/۹۹
۶ درصد زئولیت	$۱/۷۷ \times ۱۰^{-۷}$	-۸۵/۲۵	-۶۸/۵۹
۳ درصد فلدسپات	$۳/۲۲ \times ۱۰^{-۷}$	-۷۳/۱۶	-۱۴/۰۸
۶ درصد فلدسپات	$۶/۷۴ \times ۱۰^{-۷}$	-۴۳/۸۳	-۲/۹۲
کاهگل معمولی	$۱/۲ \times ۱۰^{-۶}$		





شکل۳: نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های تهیه شده با مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ و ۴۵ میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی

بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری ملات کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی میکرونیزه تکتوسیلیکاتی و مقایسه آن با کاهگل معمولی، نشان داد که هر سه ماده افزودنی انتخابی، میکروسیلیس، زئولیت و فلدسپات تاثیر مثبتی در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل در مقابل نفوذ آب دارد و با کاهش دانه‌بندی مواد افزودنی از ۱۵۰ به ۴۵ میکرون، تاثیر مثبت مواد افزودنی در کاهش ضریب نفوذپذیری و بهبود خاصیت عایق‌بندی کاهگل افزایش می‌یابد. در این میان زئولیت و فلدسپات بیشترین تاثیر را در کاهش ضریب نفوذپذیری کاهگل دارد؛ به طوری که استفاده از ۳ درصد افزودنی میکرونیزه ۴۵ میکرون از نوع زئولیت و فلدسپات، ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل را به ترتیب ۸۵/۶۶ و ۷۳/۱۶ درصد کاهش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج این آزمایش حاکی از آن است که با کاهش ابعاد و دانه‌بندی ماده افزودنی از ۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، تاثیر مواد افزودنی فوق در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود کاهگل در مقابل آب افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با استفاده از این افزودنی‌های میکرونیزه تکتوسیلیکاتی می‌توان، نفوذپذیری اندود کاهگل را به طور چشمگیری کاهش و خاصیت عایق‌بندی آن را به طور قابل ملاحظه‌ای ارتقاء داد.

۳-۳- نتایج تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی

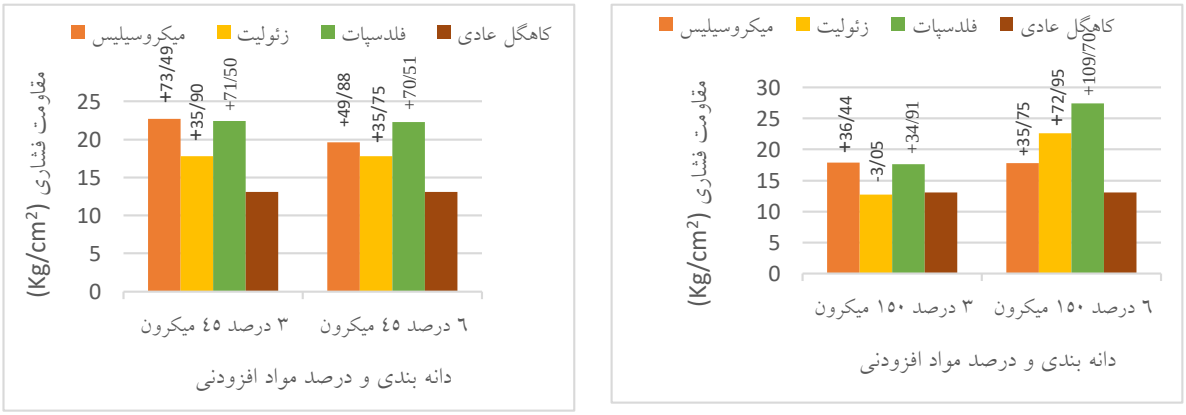
برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های ملات، از هر نسبت ترکیب، ۳ نمونه مکعبی برای آزمایش تهیه شد و با جک ملات شکن، مقاومت فشاری آنها طبق استاندارد آزمایشگاهی ASTM C109-90 تعیین گردید که نتایج حاصل به شرح زیر در جداول ۹-۸ و شکل ۴ درج شده است:

جدول۸ : نتایج تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	مقاومت فشاری به Kg/cm^2	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر به نمونه ۳ درصد
۳ درصد میکروسیلیس	۱۷/۸۶	+۳۶/۴۴	-
۶ درصد میکروسیلیس	۱۷/۷۷	+۳۵/۷۵	-۰/۶۹
۳ درصد زئولیت	۱۲/۶۹	-۳/۰۵	-
۶ درصد زئولیت	۲۲/۶۴	+۷۲/۹۵	+۷۶
۳ درصد فلدسپات	۱۷/۶۶	+۳۴/۹۱	-
۶ درصد فلدسپات	۲۷/۴۵	+۱۰۹/۷۰	+۷۴/۷۶
کاهگل معمولی	۱۳/۰۹	-	-

جدول۹ : نتایج تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۴۵ میکرون

نام ماده افزودنی و دانه بندی	مقاومت فشاری به Kg/cm^2	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به جدول ۸
۳ درصد میکروسیلیس	۲۲/۷۱	+۷۳/۴۹	+۳۷/۰۵
۶ درصد میکروسیلیس	۱۹/۶۲	+۴۹/۸۸	+۱۴/۱۳
۳ درصد زئولیت	۱۷/۷۹	+۳۵/۹۰	+۳۸/۹۵
۶ درصد زئولیت	۱۷/۷۷	+۳۵/۷۵	-۳۷/۲
۳ درصد فلدسپات	۲۲/۴۵	+۷۱/۵۰	+۳۶/۵۹
۶ درصد فلدسپات	۲۲/۳۲	+۷۰/۵۱	-۳۹/۱۹



شکل۴ : نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های تهیه شده با مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ و ۴۵ میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت فشاری ملات کاهگل بهبود یافته با مواد افزودنی و مقایسه آن با نمونه‌های شاهد، بیانگر آن است که میکروسیلیس، زئولیت و فلدسپات هر سه تاثیر چشمگیری در افزایش مقاومت فشاری ملات کاهگل دارند. استفاده از ۳ درصد میکروسیلیس ۴۵ میکرون تا ۷۳/۴۹ درصد، افزودن ۶ درصد زئولیت۱۵۰میکرون تا ۷۲/۹۵ درصد و افزودن ۶ درصد فلدسپات ۱۵۰ میکرون تا ۱۰۹/۷۰ درصد مقاومت فشاری ملات کاهگل را افزایش می‌دهد. نتایج آزمایشات نشان داد که فلدسپات تاثیر بیشتری در بهبود مقاومت فشاری کاهگل دارد. علاوه بر این، نتایج این بررسی حاکی از آن است که با کاهش ابعاد ماده افزودنی از ۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، میزان اثرگذاری مواد افزودنی در بهبود مقاومت فشاری کاهگل افزایش می‌یابد

۳-۴- نتایج اندازه‌گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی

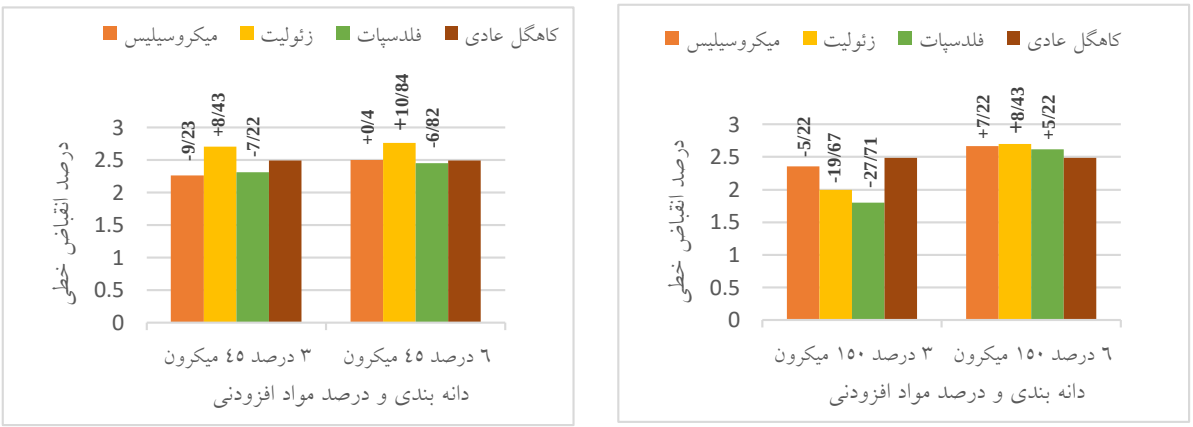
یکی از مهمترین مشکلات استفاده از ملات‌های گلی، همچون ملات کاهگل در معماری و حفاظت و مرمت بناهای تاریخی خشت و گلی، انقباض و کاهش حجم آنها پس از خشک شدن و ترک خوردن آنها در اثر انقباض بیش از حد است. ترک خوردن سطح ملات پس از خشک شدن آن، موجب ایجاد مجرایی برای ورود رطوبت ناشی از بارندگی به داخل اندود و بدنه بنا شده و منجر به فرسایش و تخریب اثر می‌گردد؛ بنابراین هرچه درصد انقباض ملات کاهگل کمتر باشد، به همان نسبت میزان دوام آن نیز در مقابل عوامل آسیب‌رسان، به ویژه رطوبت و بارندگی که دشمن اصلی مصالح خاکی است، بیشتر خواهد شد. برای اندازه‌گیری، درصد انقباض خطی نمونه‌های ملات کاهگل، طبق استاندارد BS 1377- Part 2 از آزمون قالب و آون استفاده شد، بدین ترتیب که از هریک از نمونه‌های کاهگل تهیه شده با استفاده از مواد افزودنی، ۳ نمونه نیم استوانه‌ای بوسیله قالب استاندارد مربوطه تهیه شد و پس از خشک کردن آنها در آون طبق دستوالعمل آزمایش، میزان کاهش طول نمونه‌ها و درصد انقباض خطی آنها محاسبه و سپس میانگین درصد انقباض خطی بدست آمده با نمونه کاهگل معمولی (نمونه کنترل) مقایسه گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل به شرح مندرج در جداول ۱۱-۱۰ و شکل ۵ می‌باشد:

جدول۱۰ : نتایج تعیین درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	درصد انقباض خطی	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به سایر نمونه‌ها
۳ درصد میکروسیلیس	۲/۳۶	-۵/۲۲	-
۶ درصد میکروسیلیس	۲/۶۷	+۷/۲۲	+۱۲/۴۴
۳ درصد زئولیت	۲	-۱۹/۶۷	-
۶ درصد زئولیت	۲/۷	+۸/۴۳	+۲۸/۱
۳ درصد فلدسپات	۱/۸	-۲۷/۷۱	-
۶ درصد فلدسپات	۲/۶۲	+۵/۲۲	+۳۲/۹۳
کاهگل معمولی	۲/۴۹	-	-

جدول۱۱ : نتایج تعیین درصد انقباض خطی نمونه‌های کاهگل با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۴۵ میکرون

نام ماده افزودنی و دانه بندی	درصد انقباض خطی	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به جدول ۱۰
۳ درصد میکروسیلیس	۲/۲۶	-۹/۲۳	-۴/۰۱
۶ درصد میکروسیلیس	۲/۵	+۰/۴	-۶/۸۲
۳ درصد زئولیت	۲/۷	+۸/۴۳	+۲۸/۱
۶ درصد زئولیت	۲/۷۶	+۱۰/۸۴	-۲/۴۱
۳ درصد فلدسپات	۲/۳۱	-۷/۲۲	+۲۰/۴۹
۶ درصد فلدسپات	۲/۳۲	-۶/۸۲	-۱۲/۰۴
کاهگل معمولی	۲/۴۹		



شکل۵ : نمودار تغییرات درصد انقباض خطی نمونه‌های تهیه شده با مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ و ۴۵ میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی.

بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های ملات کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی و مقایسه نتایج با نمونه‌های کنترل، نشان داد که انقباض خطی نمونه‌های جدید ملات کاهگل، در صورت استفاده از مواد افزودنی به میزان بهینه (۳ درصد) کاهش یافته و به علاوه با کاهش اندازه دانه‌بندی مواد افزودنی از ۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، میزان انقباض خطی ملات نیز کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با بررسی نتایج و وضعیت سطحی نمونه‌ها و ترک‌های تشکیل شده در سطح آنها، پس از خشک شدن ملات، به نظر می‌رسد که با کاهش ابعاد ماده افزودنی از میزان ترک‌خوردگی در سطح اندود کاهگل نیز کاسته می‌شود.

۳-۵- تعیین میزان فرسایش تحت بارش نمونه‌های کاهگل تهیه شده با مواد افزودنی میکرونیزه تکتوسیلیکاتی

مهمترین ضعف مصالح خاکی از جمله کاهگل، ضعف آنها در مقابل رطوبت و بارندگی و دوام پایین آنها در مقابل بارش است، بنابراین یکی از اهداف اصلی این تحقیق افزایش دوام و ماندگاری اندود کاهگل در برابر رطوبت و بارندگی با به‌کارگیری مواد افزودنی میکرونیزه تکتوسیلیکاتی بود. برای ارزیابی میزان دوام اندود کاهگل در برابر بارندگی از آزمایش فرسایش تحت بارش مصنوعی با 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 مطالعه قرار گرفت. در این آزمایش از یک دستگاه شبیه‌ساز باران صحرایی از نوع مولد قطره بدون فشار، طراحی شده بر اساس مدل معروف هلندی دانشگاه ویگنگن استفاده شد (شکل ۸). میانگین ارتفاع بارش دستگاه، ۵۵ سانتیمتر و میانگین قطر قطرات باران ایجاد شده، ۴/۵ میلیمتر و مساحت پلات تحت بارش دستگاه ۰/۲۵ متر مربع بود. پس از کالیبراسیون دستگاه، هر گروه سه‌تایی نمونه‌های ملات کاهگل به طور همزمان داخل پلات دستگاه با شیب ملایم ۱۱ درصد قرار داده شد و به شرح زیر تحت بارش مصنوعی باران با دستگاه شبیه‌ساز قرار گرفت.

نخست تمامی نمونه‌ها قبل آزمایش با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم به دقت توزین و ابعاد آنها به طور دقیق با کولیس با دقت ۰/۰۱ میلیمتر، اندازه‌گیری شد، سپس به منظور خشک شدن رطوبت جذب سطحی نمونه‌ها، مجددا تمامی آنها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد خشک گردید. پس از خروج نمونه‌ها از آون و سرد شدن آنها، مجددا تمامی نمونه‌ها، توزین و وزن دقیق آنها، قبل از شروع آزمایش ثبت گردید. برای انجام آزمون، تمامی نمونه‌های مورد آزمایش، پس از قرارگیری بر روی صفحه‌ای شیشه‌ای به ابعاد خود نمونه برای سهولت جابجایی آن، 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 دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و ۲۴ ساعت دیگر در آون با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا کاملا خشک شود. پس از خروج نمونه‌ها از آون و سرد شدن آنها، وزن نمونه‌ها و درصد هدر رفت ماده جامد از بدنه آنها، تحت فرسایش مصنوعی با دستگاه باران ساز، نسبت به وزن کل خشک اولیه آنها محاسبه گردید. علاوه بر این، میزان نفوذ باران و فرسایش ایجاد شده در سطح نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری و محاسبه میانگین عمق سوراخهای ایجاد شده در سطح نمونه‌های ملات با کولیس تعیین شد و سپس میانگین درصد هدر رفت و عمق نفوذ ایجاد شده در سطح هر گروه از نمونه‌های کاهگل بهسازی شده با مواد افزودنی با نمونه‌های کنترل (نمونه‌های کاهگل معمولی بدون ماده افزودنی) مقایسه و میزان تاثیر مثبت یا منفی به‌کارگیری مواد افزودنی بر دوام ملات کاهگل در برابر فرسایش ناشی از بارندگی باران مصنوعی تعیین شد که نتایج آن به شرح مندرج در جداول ۱۵-۱۲ و اشکال ۷-۶ می‌باشد:

جدول۱۲ : نتایج تعیین درصد هدر رفت بدنه نمونه‌های کاهگل تهیه شده با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی 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
کاهگل معمولی	۵/۲۵		

جدول۱۳ : نتایج اندازه‌گیری عمق نفوذ باران در سطح نمونه‌های کاهگل تهیه شده با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	عمق نفوذ باران به میلیمتر	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه‌های 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
کاهگل معمولی	۱۲/۳۶		

شکل۶ : نمودار تغییرات درصد هدر رفت و عمق نفوذ قطرات باران در نمونه‌های تهیه شده با مواد افزودنی تکتوسیلیکاتی ۱۵۰ میکرون در مقایسه با کاهگل معمولی.

جدول۱۴ : نتایج تعیین درصد هدر رفت بدنه نمونه‌های کاهگل تهیه شده با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی ۴۵ میکرون

نام ماده افزودنی و درصد	درصد هدر رفت بدنه نمونه	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه‌های جدول ۱۲
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
کاهگل معمولی	۵/۲۵		

جدول۱۵ : نتایج اندازه‌گیری عمق نفوذ باران در سطح نمونه‌های کاهگل تهیه شده با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی 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 ۱۳
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
کاهگل معمولی	۱۲/۳۶		

۴- نتیجه‌گیری

بررسی برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سنتی کاهگل بهسازی شده با افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی میکرونیزه و مقایسه نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی خواصی همچون: ضریب نفوذپذیری آب، مقاومت فشاری، درصد انقباض خطی و میزان فرسایش و دوام تحت بارندگی مصنوعی نمونه‌های ملات جدید با کاهگل معمولی، به عنوان نمونه شاهد و کنترل، حاکی از تاثیر چشمگیر مواد افزودنی فوق در بهبود ویژگی‌های مورد سنجش است، به طوری که ضریب نفوذپذیری کاهگل با استفاده از ۶ درصد افزودنی میکرونیزه ۱۵۰ میکرون زئولیت ۱۶/۶۶ درصد کاهش یافته است و با کوچک شدن اندازه ذرات مواد افزودنی و دانه‌بندی آنها از ۱۵۰ میکرون به ۴۵ میکرون، تنها با افزودن ۳ درصد زئولیت به ترکیب ملات سنتی کاهگل، کاهش ۸۵/۶۶ درصدی و اضافه کردن ۳ درصد فلدسپات، موجب کاهش ۷۳/۱۶ درصدی در میزان ضریب نفوذپذیری ملات، نسبت به کاهگل معمولی کنترل می‌گردد و به تبع کاهش ضریب نفوذپذیری کاهگل، به همان نسبت خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل در مقابل رطوبت و بارندگی بهبود می‌یابد. علاوه بر این، به‌کارگیری این مواد افزودنی، مقاومت فشاری ملات کاهگل را نیز به طور چشمگیری افزایش می‌دهد، به طوری که تنها ۳ درصد افزودنی میکرونیزه ۴۵ میکرون سیلیس تا ۷۳/۵ درصد و استفاده از ۶ درصد فلدسپات ۱۵۰ میکرون تا ۱۰۹/۷۰ درصد، مقاومت فشاری کاهگل را نسبت به کاهگل عادی ارتقاء داده و بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر مطالعات انجام شده، حاکی از آن است که استفاده از این مواد افزودنی تا حدی میزان انقباض خطی و ترک خوردگی ملات را نیز پس از خشک شدن کاهش می‌دهد. بررسی‌های انجام شده بر روی 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 آن بود که استفاده از برخی از مواد افزودنی میکرونیزه تکتوسیلیکاتی برای بهسازی کاهگل، نقش موثری در بهبود دوام و ماندگاری این مصالح آسیب‌پذیر در مقابل بارندگی دارد، به طوری که با استفاده از این مواد افزودنی می‌توان، حداکثر تا ۴۰ درصد میزان فرسایش کاهگل را در مقابل بارندگی کاهش و دوام آن را افزایش داد. از سوی دیگر، نتایج بدست آمده در این بخش، انطباق خوبی با نتایج حاصل از آزمایشات تعیین ضریب نفوذپذیری کاهگل دارد. به علاوه، نتایج آزمایشات در این بخش نشان داد که با کاهش میزان هدر رفت ماده جامد در نمونه‌های ملات بهسازی شده و افزایش دوام آنها در مقابل بارندگی، میزان نفوذ قطرات باران نیز در سطح نمونه‌های کاهگل به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

بنابراین با توجه به نتایج حاصل از این آزمایشات می‌توان گفت: علاوه بر نوع و درصد مواد افزودنی، ابعاد و دانه‌بندی مواد افزودنی مورد استفاده در بهسازی کاهگل نیز، نقش بسیار مهمی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل دارد، به طوری که با کاهش ابعاد و دانه‌بندی مواد افزودنی، به دلیل افزایش سطح ویژه مواد، تاثیر مثبت آنها نیز در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات بطور موثرتری ارتقاء می‌یابد. از سوی دیگر، در این پژوهش، اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری اندود سنتی کاهگل با بار افتان برای اولین بار، حاکی از کارایی این

روش 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 است. در یک جمع‌بندی کلی از نتایج و دستاوردهای بدست آمده از این پژوهش، می‌توان گفت:

- به‌کارگیری افزودنی‌های تکتوسیلیکاتی میکرونیزه مناسب، تاثیر بسزایی در کاهش ضریب نفوذپذیری اندود سنتی کاهگل در مقابل نفوذ آب و به تبع آن، بهبود و ارتقاء خاصیت عایق‌بندی آن در مقابل رطوبت و بارندگی بدنبال دارد.
- استفاده از 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 کاهگل می‌شود.
- با کاهش دانه‌بندی و ابعاد ذرات ماده افزودنی مورد استفاده از ۱۵۰ به ۴۵ میکرون، میزان تاثیر مواد افزودنی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد.
- درصد بهینه استفاده از مواد افزودنی میکرونیزه سیلیکاتی برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل، ۳ درصد وزنی است و افزایش میزان مواد افزودنی میکرونیزه تکتوسیلیکاتی مصرفی، تاثیر چندانی در افزایش روند بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود کاهگل ندارد.

سپاسگزاری

به این وسیله از کلیه مسئولان دانشکده حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان که شرایط و امکانات لازم را برای انجام این تحقیق مهیا نمودند سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

[1] Pieris, S. (1993). *Earthen architecture*. International scientific committee. Seri Lanka: ICOMOS.
[2] Dethier, J. (1982). *Down to earth: mud architecture, an old idea, a new future: based on an exhibition at the Centre Georges Pompidou*. Thames and Hudson.
[3] Morris, J. & Booysen, Q. (2000). *Earth construction in Africa, Proceedings: strategies for a sustainable Built Environment*, Pretoria, 23-25.
[4]Adam, E. A. & Agib, A. R. A. (2001). *Compressed Stabilized Earth Block Manufacture in Sudan*. France, Paris: Printed by Graphoprint for the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO.
[5] Zami, M. S., & Lee, A. (2002). *Contemporary earth construction in urban housing-stabilised or unstabilised?*. Proceedings: Strategies for a Sustainable Built Environment, Pretoria, South Africa, 23-25.
[6] Minke, G. (2000). *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*. WIT Press; Computational Mechanics,
[7] Houben, Hugo; Guillaud, Hubert. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*, London,: Intermediate technology Publications.
[8] Alva balderrame, Alejandro. (2001). *Earthen architecture.* Los Angeles: The Getty conservation institute Newsletter, 16(1).
[9] Keefe, L. (2005). *Earth building: methods and materials, repair and conservation*. London and New York: Taylor & Francis.
[10] Fratini, F., Pecchioni, E., Rovero, L., & Tonietti, U. (2011). *The earth in the architecture of the historical centre of Lamezia Terme (Italy): characterization for restoration.* Applied Clay Science, 53(3), 509-516.
[11] Roy, Sangeeta, Chowdhury, Swaptik. (2013). *Earth as an Energy Efficient and Sustainable Building Material.* International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS) 1(2) 248-252.
[12] Warren, J. (1999). *Conservation of earth structures*. Butterworth-Heinemann.
[13] Gandreau, D, Delboy, L. (2010). *Patrimoine mondial, Inventaire et situation des biens construits en terre, sous la direction de: Joffroy*, T., Paris: CRAterre-ENSAG, UNESCO/CH/CPM.
[14] Anger, R., Fontaine, L., Joffroy, T., & Ruiz, E. (2011). *Earthen construction, another way to house the planet*. Private Sector & Development, (10), 18-21.
[15] Maheri, Mahmoud R., Maheri, Alireza, Pourfallah, Saeed, Azarm, Ramin, & Hadjipour, Akbar. (2011). *Improving the Durability of Straw-Reinforced Clay Plaster Cladding for Earthen Buildings*. International Journal of Architectural Heritage, 5(3), 349-366.
[16] 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*. In Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage, Getty Publications, 239-246.

[17] Rahimnia, R & Heidari Bani, D. (2011). *The Effect of Plasticity Index (PI) on the Tensile and Compressive Strength of Cement-Stabilized Adobes for Conservation of Adobe Structures.* Journal of conservation studies and cultural sites research, 1 (2), 91-102.
[18] Alavéz-Ramírez., R, Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., & Gochi-Ponce, Y. (2012). *The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks.* Construction and Building Materials, 34, 296-305.
[19] Miqueleiz, L; Ramirez, F; Oti, J.E; Seco, A; Kinuthia, J.M; Oreja, I & Urmeneta, P. (2013). *Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production.* Engineering Geology, 163, 68–74.
[20] Eires, R., Aires Camões, & Said Jalali (2013). *Earth architecture: ancient and new methods for durability improvement.* ICSA2013-2nd International Conference on Structures and Architecture. CRC Press Taylor & Francis Group, 962-970.
[21] Trivedi, Jyoti S., Sandeep Nair, and Chakradhar Iyyunni. (2013). *Optimum utilization of fly ash for stabilization of sub-grade soil using genetic algorithm.* Procedia Engineering 51, 250-258.
[22] Anupam, Aditya Kumar, and Praveen Kumar. (2013). *Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 104, 264-273.
[23] El-Mahllawy, Medhat S., and Ayman M. Kandeel. (2014). *Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks.* HBRC Journal, 10(1), 82-91.
[24] Georgiev, G., W. Theuerkorn, M. Krus, R. Kilian, & T. Grosskinsky. (2014). *the potential role of cattail-reinforced clay plaster in sustainable building*. Mires and Peat, 13, 1-13.
[25] Hejazi M, Hashemi M, Jamalinia E, Batavani M. (2015). *Effect of Additives on Mechanical Strengths of Adobe Made From Soils of Isfahan.* Journal of Housing and Rural Environment, 34 (151), 67-80.
[26] Zhang, J; Chen, W; Li, Z; Wang, X; Guo, Q & Wang, N. (2015). *Study on workability and durability of calcined ginger nuts-based grouts used in anchoring conservation of earthen sites.* Journal of Cultural Heritage, 16, 831–837.
[27] Corrêa, Andréa Aparecida Ribeiro, Lourival Marin Mendes, Normando Perazzo Barbosa, Thiago de Paula Protásio, Nathalia de Aguiar Campos, & Gustavo Henrique Denzin Tonoli. (2015). *Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes*. Construction and Building Materials, 98, 250-256.
[28] Sharma, Vandna, Hemant K. Vinayak, and Bhanu M. Marwaha (2015). *Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement*. International Journal of Sustainable Built Environment, 4(2), 348-358.
[29] Calatan, Gabriela, G., Hegyi, A., Dico, C., & Mircea, C. (2016). *Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks*. Procedia Technology, 22, 259-265.