تأثیر مدت زمان عمل‌آوری ملات سنتی کاهگل بر مقاومت فشاری و کششی آن

مسعود باتر *، حسین احمدی **، جهانگیر عابدی کوپایی ***، رحمت‌اله عمادی ****

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹٤/۰۲/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹٤/۱۱/۰٦

چکیده

استفاده از خاک و مصالح خاکی، به‌دلیل ارزانی، فراوانی و سهولت دسترسی به آن در بیشتر مناطق جهان، از گذشته‌های دور تاکنون به‌ویژه در نواحی گرم و خشک رایج بوده است. در ایران نیز که بخش اعظم آن در منطقه گرم و خشک واقع شده، استفاده از مصالح خاکی، بخشی از فرهنگ و هویت معماری ما را در مناطق شهری و روستایی تشکیل داده است. در میان مصالح مختلف خاکی، کاهگل یکی از قدیمی‌ترین ملات‌ها و اندودهای سنتی است که از گذشته تاکنون برای عایق‌بندی پشت بام و نمای ساختمان در مقابل رطوبت و بارندگی استفاده شده است. با وجود آن که امروزه اهمیت فوق‌العاده عمل‌آوری صحیح مصالح، به‌ویژه ملات‌ها و اندودهای ساختمانی جدید، کاملاً شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته است ولی تاکنون تحقیقی در این زمینه بر روی تأثیر روش عمل‌آوری و طول مدت زمان آن بر کیفیت و خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل انجام نشده است. در واقع هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اهمیت و تأثیر مدت زمان عمل‌آوری کاهگل بر خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی این ملات سنتی و کهن با استفاده از روش‌های تجربی است و تلاش برای یافتن پاسخ این سئوال که مدت زمان عمل‌آوری کاهگل، چه تأثیری بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات دارد؟ و مناسب‌ترین مدت زمان عمل‌آوری این ملات برای دستیابی به مقاومت مورد نظر و دوام بیشتر کدام است؟ مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، نشان داد که مقاومت فشاری و کششی ملات کاهگل به شدت متأثر از میزان الیاف کاه مورد استفاده در ملات است، به‌طوری‌که با افزایش درصد الیاف کاه، میزان مقاومت مکانیکی ملات کاهش می‌یابد، از سوی دیگر با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، میزان مقاومت فشاری و کششی ملات کاهگل نیز ارتقاء می‌یابد که بخش اعظم این افزایش مقاومت مکانیکی در ۷۲ ساعت اول روی می‌دهد و با استمرار روند عمل‌آوری، این افزایش با آهنگ ملایمی تا ۱۰ شبانه روز ادامه می‌یابد. بررسی‌های تجربی انجام شده همچنین حاکی از آن است که مناسب‌ترین محدوده زمانی برای عمل‌آوری کاهگل ۳-۷ شبانه روز می‌باشد.

واژگان کلیدی: معماری خشت و گلی، کاهگل، عمل‌آوری، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

* مربی گروه مرمت آثار تاریخی، دانشگاه زابل و دانشجوی دکترای مرمت، دانشگاه هنر اصفهان. masoud.bater@gmail.com
** دانشیار گروه مرمت آثار، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.
*** استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
**** دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مقدمه

از حدود ۱۰ هزار سال پیش تا به امروز که بشر شروع به شهرسازی و معماری کرده است، خاک، جدای از اعتقادات و سنت‌های تاریخی و مردمی، یکی از مهمترین و اصلی‌ترین مصالح ساختمانی بر روی کره خاکی به‌شمار می‌رود(Rastorfer, 1985:32; Zami, & Lee, 2011:42) (دوتیه، ۱۳۸۵: ۵).

در واقع خاک در دسترس‌ترین و ارزان‌ترین مصالح ساختمانی است که در تمام دنیا به‌وفور یافت می‌شود و از طرفی، توانایی سازگاری با اقلیم‌های مختلف را نیز دارا است و هنوز هم در کشورهای در حال توسعه، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pieris, 1993:28; Morris, & Booysen, 2000; Adam & Agib, 2001; Zami & Lee, 2002:5).

تقریباً در تمام اقلیم‌های گرم و خشک و معتدل جهان خاک رایج‌ترین مصالح ساختمانی است (مینکه، ۱۳۸۸: ۱۷). این سنت دیرپا، تداوم شگفت‌انگیزی نیز داشته است به‌طوری‌که امروزه برآورد می‌شود حدود ۳۰ درصد از جمعیت جهان؛ یعنی تقریباً ۱/۷–۱/۵ میلیارد نفر در خانه‌های ساخته شده از مصالح خشت و گلی زندگی می‌کنند (Houben, & Guillaud, 1994:6; Alva balderrame, 2001:3; Keefe, 2005: 7; Fratini, et al, 2011:509; Roy & Chowdhury, 2013:248) (دوتیه، ۱۳۸۵: ۵؛ وارن، ۱۳۸۷: ۱۵؛ مینکه، ۱۳۸۸: ۱۷). طبق آخرین آمار منتشر شده از سوی مؤسسه کراتره[1]، مرکز بین المللی معماری خشت و گلی در گرانوبل[2] فرانسه، امروزه حدود ۲ میلیارد نفر که در ۱۵۰ کشور جهان پراکنده‌اند در خانه‌های ساخته شده از مصالح خاکی ساکن هستند (CRATerre, 2015).

در ایران نیز بر طبق سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰ هجری شمسی، از ۱۹۹۵۴۱۱۴ واحد مسکونی کل کشور، ۱۰۵۱۹۸۴ واحد از خشت و گل ساخته شده است که ۵/۲۷ درصد کل آمار واحدهای مسکونی ایران را شامل می‌شود. براساس این آمار، از کل واحدهای مسکونی خشت و گلی موجود، ۷۱/۴۲ درصد آن در نقاط روستایی و ۲۸/۵۷ درصد آن در نقاط شهری ساخته شده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰: ۴۲۵).

طبق آمار منتشر شده از سوی سازمان بین المللی یونسکو[3]، ۱۵–۱۰ درصد از آثار ثبت شده در فهرست میراث جهانی یونسکو را یادمان‌های معماری خشت و گلی تشکیل می‌دهند. این در حالی است که حجم زیادی از میراث خشتی جهان در کشورهای مختلف، در معرض خطر می‌باشد به‌طوری‌که براساس آمار موجود، حدود ۵۷ درصد از این محوطه‌ها در فهرست آثار درحال خطر یونسکو قرار دارند (Alva balderrame, 2001:4; Gandreau, & Delboy, 2010; Anger, et al, 2011:18)

منابع اصلی ما، در دستیابی به دانش لازم برای حفاظت این آثار ارزشمند از دو بستر عمده حاصل می شود: نخست، روش های سنتی متداول در حفاظت و تداوم طول عمر این سازه‌ها که با مطالعه خود آثار و استخراج سنت‌های بومی موجود در این رابطه قابل دستیابی است و دیگری، استفاده از دانش روز، برای تصحیح و تکمیل این روش‌ها (وارن، ۱۳۸۷: ۹).

ملات‌هایی که از خاک تهیه می‌شوند، از قدیمی‌ترین و مهمترین ملات‌های مورد استفاده در معماری ایران بوده است. ملات گل در گذشته برای اندود کردن ساختمان های خشتی، زیرسازی آستر گچی و آب‌بندی پشت‌بام ساختمان های روستایی به‌کار می‌رفته است (خدابنده و همکاران، ۱۳۷۹: ۵). کاهگل یکی از قدیمی‌ترین و مهمترین این ملات‌ها است که از دیرباز در فلات ایران مورد استفاده قرار گرفته (ماجدی اردکانی، ۱۳۸۳: ۱۵۴) و بخش اعظم نما و بام ابنیه و بافت تاریخی، در مناطق گرم و خشک ایران با آن،

پوشش داده شده است. در واقع، اندود کاهگل، بخش جدایی‌ناپذیری از هویت معماری کشور ما در بسیاری از بناهای تاریخی شهری و روستایی است (Maheri, et al, 2011:350). قابلیت‌ها و خصوصیات ویژه 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 به‌عنوان یک پوشش حفاظتی سنتی در بسیاری از بناهای تاریخی و محوطه‌های باستانی مورد استفاده قرار گیرد، به‌گونه‌ای که استفاده از آن‌را به‌طور وسیع و گسترده در بسیاری ابنیه تاریخی و محوطه های باستانی مهم، از جمله شوش، چغازنبیل، هفت تپه، شهر سوخته، کوه خواجه، ارگ بم و بافت تاریخی شهرهایی همچون یزد، اصفهان، کرمان و کاشان شاهد هستیم.

پیشینه تحقیق

از گذشته‌های دور، کاهگل به‌عنوان یک پوشش حفاظتی، برای پوشش سطوح خارجی بنا و نیز عایق‌بندی پشت بام در مقابل رطوبت و بارندگی به‌کار می‌رفته است، علاوه بر این، استفاده از یک لایه اندود کاهگل به ضخامت ۵-۳ سانتیمتر در سطح خارجی بنا، دارای خاصیت عایق حرارتی نیز می‌باشد (Maheri, 2011:350 et al,) که در محافظت ساختمان‌ها، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک در مقابل تغییرات شدید دما، بسیار مهم و حیاتی بوده است، به‌طوری‌که امروزه، هنوز هم در بسیاری از نقاط جهان، به‌ویژه در مناطق روستایی، از جمله خاورمیانه، آسیای مرکزی، آفریقا و آمریکای مرکزی و جنوبی از اندود کاهگل برای عایق‌بندی، ضدآب نمودن و حفاظت از ساختمان‌های خشت و گلی استفاده می‌شود.

اندودها، یک لایه حفاظتی برای ساختمان، در مقابل حملات خارجی همچون نفوذ رطوبت، سایش و عوامل بیولوژیک ایجاد می‌نمایند. بدین ترتیب حتی در صورت آسیب دیدن اندود، به سادگی می‌توان آن‌را تجدید نمود، چون همواره تجدید اندودها، آسانتر از تجدید ساختار خود بناست (Matero, 1999)، به‌همین خاطر است که چه در داخل و چه در خارج بنا، اندودها سطحی را تشکیل می‌دهند که در زمان حیات بنا، پس از هر بار فرسودگی، پیوسته و به‌طور دوره‌ای، بارها تجدید شده‌اند.

برای تهیه کاهگل، پس از تهیه خاک مناسب و اختلاط آن با درصد مناسبی الیاف کاه گندم، آن‌را به‌صورت آخوره درآورده و سپس بر روی آن آب می‌بندند و پس از گذشت مدتی و خیس خوردن ذرات خاک و الیاف کاه، با لگد کردن آن توسط نیروی انسانی، ملات کاهگل را به خوبی ورز می‌دهند تا خاک، الیاف کاه و آب جذب شده توسط آن‌ها به‌خوبی با یکدیگر درآمیزد، ضمن آن که ورز دادن گل، موجب می‌شود، حباب‌های هوایی که در درون گل محبوس شده، خارج گشته و کیفیت کاهگل تهیه شده بهبود یابد. پس از ورز دادن کاهگل آن‌را برای چند روز در معرض رطوبت قرار می‌دهند تا ملات کاهگل، خوب قوام پیدا نموده و عمل آید. پس از گذشت مدت زمان خوابانیدن گل و قبل از استفاده، مجدداً ملات کاهگل با بیل، توسط نیروی انسانی کاملاً زیر رو می‌شود تا کاهگل کاملاً همگن و یکدست شده و برای استفاده و اندود نمودن نما و پشت بام ساختمان آماده و مهیا شود (تصاویر شماره ۷-۱).

برای عمل‌آوری ملات کاهگل، معمولاً رهاسازی آن تحت رطوبت، چند روز طول می‌کشد تا در طی این مدت دانه‌های خاک و الیاف کاه کاملاً خیس خورده و از یکدیگر باز شوند (Maheri, et all, 2011: 352) (ماریانی، ۱۳۷۵: ۱۸؛ زمرشیدی، ۱۳۷۷: ۱۲۷؛ فرخیار، ۱۳۸۷: ۱۶۵؛ زرگر، ۱۳۹۰: ۲۱۳؛ رضازاده اردبیلی، ۱۳۹۰: ۱٦٤؛ عالی، ۱۳۹۳: ٥٦).

ت ۱. مخلوط کردن خاک و الیاف کاه برای تهیه کاهگل. مأخذ: نگارنده.

ت ۲. آخوره بستن خاک و الیاف کاه برای اختلاط با آب. مأخذ: نگارنده.

ت ۳. ورز دادن کاهگل با لگد کردن آن توسط نیروی انسانی. مأخذ: نگارنده.

ت ٤. خوابانیدن کاهگل برای عمل‌آوری. مأخذ: نگارنده.

ت ۵. مخلوط کردن و زیر و رو کردن کاهگل قبل از استفاده. مأخذ: نگارنده.

ت ٦. اندود کردن نمای بنا با کاهگل. مأخذ: نگارنده.

ت ۷. استفاده از سیمگل بر روی اندود کاهگل.
مأخذ: نگارنده.

مدت زمانی که برای عمل‌آوری ملات کاهگل، تحت رطوبت از طریق ماندگاری و رهاسازی آن، در منابع مختلف بیان شده، بسیار متفاوت است و در هیچ کدام از این منابع، برای مدت زمان ماندگاری ذکر شده جهت عمل‌آوری کاهگل، معیار و دلیلی اقامه نشده است. آن چه که در بیشتر منابع مشاهده می‌شود، تنها تأکید بر اهمیت عمل‌آوری کاهگل با ماندگاری آن تحت رطوبت برای قوام بهتر ملات است. از سوی دیگر، مدت زمانی که برای عمل‌آوری در منابع مختلف برای ملات کاهگل ارائه شده از ٢٤ ساعت تا ١٥ شبانه روز متفاوت است.
ماریانی در گزارش خود از عملیات مرمت و بازپیرایی دهانه‌غلامان و کوه خواجه در سیستان برای حفاظت ساختارهای خشت و گلی یادمان‌های تاریخی فوق از اندود کاهگل استفاده نموده و در گزارش خود، مدت زمان یک روز را برای نگاه داشتن ملات کاهگل در زیر سطح اندکی از آب برای جهت عمل‌آوری کافی می‌داند (ماریانی، ١٣٧٥: ١٨). گروهی نیز برای عمل‌آوری ملات کاهگل معتقدند که ملات جهت عمل آمدن، بایستی ٣-٢ روز به حال خود رها شود تا قوام آید (زمرشیدی، ١٣٧٧: ١٢٧؛ فرخ‌یار، ١٣٨٧: ١٦٥؛ رضازاده اردبیلی، ١٣٩٠: ١٦٤؛ رحیم‌نیا، ١٣٩٢: ٢٩) ولی شماری نیز معتقدند که عمل‌آوری ملات کاهگل به زمان بیشتری نیازمند است و لزوم ماندگاری ملات کاهگلی که برای اندودکاری در معماری سنتی به کار می‌رود را به مدت ١٥ روز تحت رطوبت و ورز دادن گوشزد می‌نمایند (بزرگمهری، ١٣٨١: ١٥٧؛ مرادی و محب‌علی، ١٣٩٣: ٤٢). در مقابل این افراط و تفریط، بعضی از منابع، حد میانگین این دو زمان را برای عمل‌آوری ملات کاهگل کافی دانسته و اعتقاد دارند که این ملات، بایستی یک هفته به حال خود رها شود تا عمل بیاید (ابراهیم‌زاده حسن‌آبادی، ١٣٩٠: ١٢٣)، از سوی دیگر، چندی از محققین و متخصصان نیز زمان مشخصی را برای عمل‌آوری ملات کاهگل ذکر نکرده و فقط اشاره‌ای دارند مبنی بر این که کاهگل بایستی برای عمل‌آوری چند روز تحت رطوبت به حال خود رها (زرگر، ١٣٩٠: ٢١٣). (Maheri, et all, 2011: 352)شود

با وجود کاربرد وسیع و گسترده اندود کاهگل در ابنیه سنتی و تاریخی، این اندود از معایبی نیز برخوردار است که موجب شده استفاده از آن به تدریج در معماری دوران معاصر، تقریباً منسوخ شده و استفاده از آن به‌عنوان یک پوشش حفاظتی برای محافظت میراث معماری خشت و گلی و عایق‌بندی ساختمان‌ها نیز، با مشکلاتی همراه باشد. 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 پس از خشک شدن، از جمله مهمترین معایب این اندود سنتی است.
به‌دلیل معایبی که اندود کاهگل داشته، در سالیان اخیر به تدریج در بیشتر نواحی گرم و خشک، به‌خصوص در مناطق شهری و بسیاری از مناطق روستایی برای عایق‌بندی بنا، به‌ویژه پشت بام، اندود قیر جایگزین

کاهگل شده است. استفاده از قیر به جای اندود کاهگل برای عایق‌بندی بنا در مقابل رطوبت، دارای مزایایی همچون مقاومت بالا در برابر رطوبت، دوام بسیار در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی، سهولت و سرعت بالای اجرا و سبکی وزن است. با این وجود، قیر برای آب و هوای گرم و خشک، توام با نوسانات زیاد دما مناسب نیست، چون مستعد فرسایش ناشی از نوسانات و چرخه‌های گرم و سرد شدن ناشی از تغییرات دما است. توجه به این نکته مهم از این جهت دارای اهمیت است که بخش اعظم کشور ایران در کمربند خشک جهان قرار دارد (تقوایی، ۱۳۸۵: ۲؛ مرادی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱؛ نگارش، فلاح فیروزآباد و خسروی، ۱۳۹۰: ۷۰) و دارای مناطقی با شرایط سخت اقلیمی و مناطق گرم و خشک و کویری است که بر طبق آمار و گزارش‌های موجود، از کل مساحت ۱۶۵ میلیون هکتاری ایران، حدود ۱۲۰ میلیون هکتار یعنی ۷۲/۲ درصد از کل مساحت کشور در شرایط اقلیمی گرم و خشک قرار گرفته که ۴۳ میلیون هکتار آن یعنی حدود یک چهارم آن، مناطق بیابانی است (رهبر، ۱۳۸۱؛ تقوایی، ۱۳۸۵: ٦؛ مرادی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱). به‌علاوه، قیر در مقابل بخار آب نیز نفوذناپذیر است که توجه به این نکته مهم از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

در مقایسه با قیر، اندود کاهگل با آب و هوای گرم و خشک، همراه با نوسانات شدید دما، کاملاً سازگار بوده و برخلاف قیر نفوذپذیری آن نسبت به بخار آب بالا است و همزمان مانع نفوذ آب باران به داخل بنا می‌شود (Maheri, 2011:350 ,et al). نفوذپذیری اندود مورد استفاده برای عایق‌بندی رطوبتی بنا، نسبت به بخار آب و انتقال آن از میان دیواره‌های بنا به بیرون، از طریق خلل و فرج موجود در مصالح و اندود، طبق قاعده لوله‌های مویین در هنگام کاهش رطوبت و افزایش دما و امکان تنفس، به‌ویژه در ابنیه خشت و گلی بسیار لازم و ضروری است،(Maravelaki-Kalaitzaki, 2007). زیرا ممانعت از عبور بخار آب و انتقال و جابه‌جایی نمک‌های محلول به‌وسیله هر نوع مانع و سدی و عدم امکان تنفس در بنا موجب حبس رطوبت و فعال شدن نمک‌های محلول در حضور رطوبت می‌شود که نتیجه آن تبلور نمک‌های محلول و ایجاد آسیب‌های جدی به‌صورت نهان‌شکفتگی و شوره‌زنی در مصالح است که موجبات فرسایش شدید بدنه بناهای خشت و گلی را فراهم می‌آورد.

با وجود معایبی که اندود کاهگل دارد، به‌دلیل سازگاری خوب آن با ساختار بناهای خشت و گلی، هنوز هم در عایق‌بندی رطوبتی برخی از ساختمان‌ها و همچنین حفاظت بناها و محوطه‌های تاریخی خشت و گلی کاربرد گسترده‌ای دارد. عایق‌بندی بنای خشت و گلی با استفاده از اندود کاهگل برای حفاظت آن، در مقابل رطوبت و بارندگی، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است چون بدین ترتیب، ساختارهای خشتی بنا از آسیب ناشی از عوامل محیطی، به‌ویژه بارندگی مصون مانده و محافظت می‌شوند اما چون کاهگل خود، به‌طور دائم، در معرض رطوبت و عوامل مخل محیطی است، به تدریج فرسایش یافته و قابلیت عایق‌بندی و حفاظتی خود را از دست می‌دهد. به‌همین خاطر بعد از ۲-۱ سال، بایستی اندود کاهگل تجدید شود. به‌همین خاطر در بیشتر مناطقی که معماری خشت و گلی مرسوم است، معمولاً طبق سنت، هرساله، اندود گلی نمای ساختمان و پشت بام آن، بعد از فصل بارندگی، دوباره تجدید و مرمت می‌شود (دوتیه، ۱۳۸۵: ۷). در واقع، این اندود، یک پوشش حفاظتی فدا شونده است که برای محافظت از ساختار اصلی 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، به‌عنوان یک پوشش عایق

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، به‌ویژه رطوبت و بارندگی، حکایت از ناپایداری و مقاومت پایین آن در مقابل رطوبت دارد. پژوهش‌های انجام شده در مورد بهبود خواص و تثبیت خاک، حاکی از آن است که با استفاده از برخی از مواد افزودنی 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 نما و بام ابنیه تاریخی خشت و گلی جهت حفاظت آن در مقابل عوامل آسیب‌رسان محیطی به‌ویژه رطوبت و بارندگی، مطالعه برای یافتن راه‌حل‌های علمی مناسب به‌منظور افزایش دوام و طول عمر مفید اندود کاهگل بسیار لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد و توجه به این ملات سنتی کهن و تلاش برای احیای آن از اهمیت بسیاری برخوردار است.

طرح مسئله

امروزه اهمیت مرحله عمل‌آوری در تهیه ملات‌های ساختمانی جهت دستیابی به ملاتی با مقاومت و دوام بالا در بیشتر ملات‌های ساختمانی جدید اعم از ملات‌های سیمانی، آهکی، گچی و غیره، کاملاً شناخته شده و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است ولی تاکنون تحقیقی در زمینه تأثیر مدت زمان و نحوه عمل‌آوری بر خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل انجام نشده است.

در ادبیات مکتوب و تجربیات شفاهی موجود در میان معماران سنتی ایران، متداول‌ترین روش برای عمل‌آوری ملات کاهگل، ورز دادن مداوم ملات از طریق لگد کردن آن به‌وسیله نیروی انسانی و همچنین ماندگاری طولانی مدت آن در معرض رطوبت است. با این وجود در مورد مدت زمان ماندگاری ملات برای عمل آمدن و قوام آن، توافقی بین متخصصان و محققان وجود ندارد. به‌علاوه، درباره نحوه تأثیر و مکانیسم بهبود خواص ملات کاهگل تحت تأثیر این شیوه عمل‌آوری سنتی نیز، کمتر مطلب مستندی در منابع مکتوب و فرهنگ شفاهی ما به چشم می‌خورد.

تحقیق به روش تجربی با مطالعات آزمایشگاهی بر روی ملات‌های مختلف، اهمیت و تأثیر مدت زمان و نحوه عمل‌آوری را بر بهبود خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی ملات‌ها روشن و به اثبات رسانده است ولی در مورد بسیاری از ملات‌های سنتی ایران، از جمله کاهگل وضع چنین نیست.

در میان ادبیات محدود موجود و تجربیات بجای مانده از معماران کهنسال سنتی ایران تنها اشاراتی کوتاه و ناقص در این زمینه موجود است که فحوای کلام تمامی آن‌ها تنها به اینجا ختم می‌شود که تأثیر مدت زمان عمل‌آوری ملات کاهگل و ماندگاری آن بر بهبود خواص این ملات سنتی مثبت است ولی تاکنون هیچگاه به‌طور عملی و با استناد به روش‌های آزمایشگاهی استاندارد، صحت و سقم این مسئله مورد بررسی و مطالعه و بحث قرار نگرفته است. عدم دسترسی به منابع علمی مستند و قابل اعتماد در این زمینه و عدم تحقیق و بررسی جدی در این حوزه مهم از معماری سنتی ایران که اهمیت فوق‌العاده آن در معماری و مسکن‌سازی به‌ویژه در مناطق روستایی و حفاظت و مرمت بناهای خشت و گلی بر کسی پوشیده نیست، این گروه تحقیقاتی را بر آن داشت تا پژوهشی را به روش تجربی و با اتکای به تکنیک‌های آزمایشگاهی استاندارد انجام دهد تا برخی از زوایای مهم و پنهان این بخش از معماری سنتی ما آشکار گردد. مهمترین پرسش‌هایی که پیش روی این تحقیق بوده است به این شرح می‌باشد:

۱- تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل چیست؟

۲- تأثیر زمان عمل‌آوری و ماندگاری ملات کاهگل بر دو شاخص مهم مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات چگونه است؟

۳- مناسب‌ترین مدت زمان عمل‌آوری و ماندگاری ملات کاهگل برای دستیابی به مقاومت مورد نظر و دوام بیشتر کدام است؟

روش تحقیق

این تحقیق به روش تجربی، با مطالعات آزمایشگاهی بر روی ملات کاهگل به‌منظور دستیابی به اهمیت و تأثیر مدت زمان و نحوه عمل‌آوری این ملات سنتی و کهن بر بهبود خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی آن به‌ویژه مقاومت فشاری و کششی ملات کاهگل انجام شده است. برای این منظور پس از مطالعه کتابخانه‌ای و بررسی میدانی خاک مناطق مختلف شهرستان اصفهان و حومه آن، از ٤ منطقه مختلف در اطراف اصفهان که مطالعات و مشاهدات بصری کیفیت آن‌ها را برای تهیه مصالح خاکی تأیید می‌نمود، به‌طور تصادفی نمونه‌برداری شد. سپس نمونه‌های خاک تهیه شده، با آزمون‌های مختلف مکانیک خاک مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و پس از تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این آزمایشات، بهترین و مناسب‌ترین نمونه خاک برای تهیه ملات کاهگل انتخاب گردید. در مرحله بعد نمونه‌های مختلفی از ملات کاهگل با درصدهای مختلف الیاف کاه گندم تهیه شد و مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن‌ها به روش‌های آزمایشگاهی استاندارد مورد سنجش قرار گرفت و بدین ترتیب مناسب‌ترین ترکیب کاهگل از نظر میزان الیاف کاه برای انجام مراحل بعدی آزمایش انتخاب و سپس تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر روی خواص مکانیکی ملات کاهگل بررسی شد، بدین منظور ترکیب ملات کاهگل از نظر نوع خاک، بافت و دانه‌بندی خاک، نوع الیاف، میزان الیاف، نحوه تهیه، شیوه عمل‌آوری و مقدار آب مصرفی ثابت در نظر گرفته شد و مدت زمان عمل‌آوری به‌عنوان متغیر مستقل تحقیق، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی از ملات کاهگل، مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌ها با روش‌های آزمایشگاهی دستگاهی اندازه‌گیری شد. یکی از مهمترین مشکلات و موانع این پژوهش، عدم وجود و دسترسی به روش‌های آزمایشگاهی استاندارد مختص مواد و مصالح خاکی بود یعنی روش‌های آزمایشگاهی 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 مکانیکی ملات کاهگل استفاده شد. یکی از دغدغه‌های مهم این پژوهش، عدم وجود استانداردهای مورد نیاز در این حوزه و تلاش برای دستیابی به استانداردهای لازم برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی است.

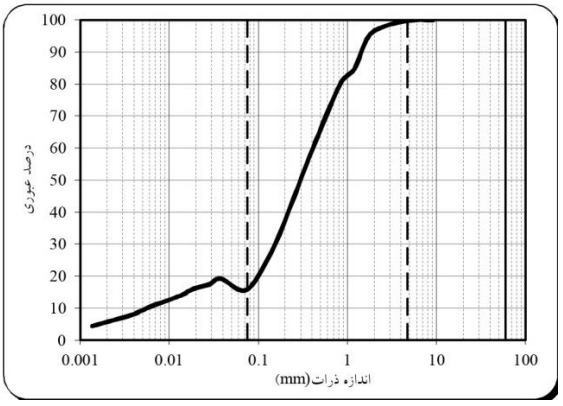
مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های خاک

پس از بررسی مطالعات خاک‌شناسی انجام شده، توسط سایر محققین در مناطق مختلف اصفهان و حومه آن و بررسی میدانی خاک این مناطق، ٤ منطقه به شرح زیر برای نمونه‌برداری جهت تهیه مناسب‌ترین خاک انتخاب گردید:

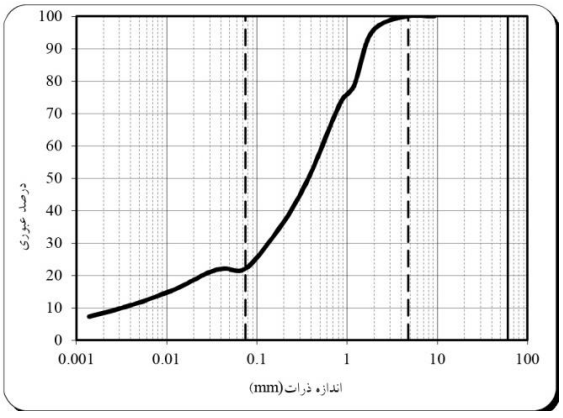
۱- منطقه سین در شمال اصفهان
۲- منطقه سگزی در شرق اصفهان
۳- منطقه محمودآباد در شمال غرب اصفهان
٤- منطقه دشت مهیار در جنوب اصفهان

از هریک از مناطق فوق به میزان ۵۰ کیلوگرم نمونه خاک برداشته شد و پس از نمونه‌گیری از هر کیسه خاک به روش چهار قسمتی، مطابق با استاندارد AASHTO14-248، مطالعات آزمایشگاهی برای شناخت ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آن‌ها، شامل تعیین درصد مواد آلی، اندازه‌گیری درصد رطوبت، آزمایش دانه‌بندی (نمودارهای شماره ٤-۱)،

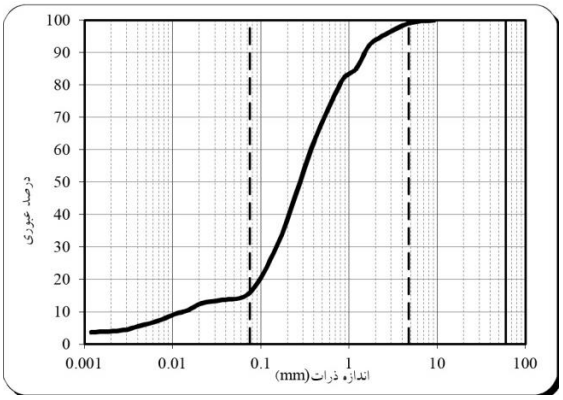
تعیین حدود اتربرگ، اندازه‌گیری چگالی ویژه خاک، تعیین pH، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و میزان انقباض خطی خاک، مطابق با استانداردهای بین المللی انجمن مواد و آزمون آمریکا[۴]، انجمن ادارات حمل و نقل و بزرگراه‌های ایالتی امریکا[۵] و مؤسسه استانداردهای انگلیس[۶] در شرایط آزمایشگاهی و با رعایت استانداردهای لازم به شرح مندرج در جدول شماره ۱ انجام شد. در آزمایش دانه‌بندی به‌طور هم‌زمان از الک (الک‌های شماره مش ٤، ٨، ١٢، ١٦، ٢٠، ٤٠، ٦٠، ١٠٠ و ٢٠٠) و هیدرومتری استفاده شد و براساس نتایج حاصله طبقه‌بندی و بافت خاک مشخص شد.



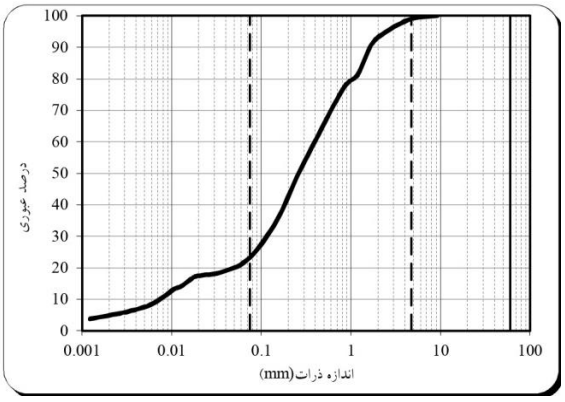
ن ۱. دانه‌بندی خاک شماره یک از منطقه سین.



ن ۲. دانه‌بندی خاک شماره دو از منطقه سگزی.



ن ۳. دانه‌بندی خاک شماره سه از منطقه محمودآباد.



ن ٤. دانه‌بندی خاک شماره چهار از منطقه مهیار.

نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی نمونه خاک‌های مناطق مختلف فوق به روش‌های آزمایشگاهی مورد نظر در جدول شماره ۲ مندرج است.

انتخاب خاک مناسب

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های خاک، هرچند تمامی نمونه‌ها از نظر خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نمونه‌های قابل قبولی بوده و از نظر بافت براساس آزمایشات دانه‌بندی با الک و هیدرومتری جزء خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار طبقه‌بندی

می‌شوند ولی تفاوت‌های آشکاری نیز میان آن‌ها مشاهده می‌گردد. تعیین حدود اتربرگ نمونه‌های خاک حاکی از آن است که با توجه به پایین‌تر بودن دامنه خمیری خاک منطقه مهیار، نسبت به سایر نمونه‌ها، این خاک کمتر دچار ترک می‌شود درحالی‌که خاک‌های مناطق سگزی، سین و محمودآباد به ترتیب به‌دلیل داشتن بالاترین دامنه خمیری، آمادگی و تمایل بیشتری به ترک‌خوردگی دارند. علاوه بر این، این داده‌ها با نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری درصد انقباض خطی نمونه‌های خاک به‌خوبی مطابقت دارد، به‌طوری‌که کمترین درصد انقباض خطی، مربوط به خاک مهیار و بیشترین میزان انقباض خطی را خاک منطقه سگزی از آن خود کرده است و خاک‌های مناطق سین و محمودآباد در رتبه‌های بعدی می‌باشند. با توجه به اهمیت میزان انقباض نمونه خاک پس از خشک شدن، روشن است که هرچه درصد انقباض خاک کمتر باشد، به همان نسبت میزان ترک‌ها و ریزترک‌های ایجاد شده در سطح ملات تهیه شده از خاک نیز کاهش می‌یابد که از این نظر نیز خاک مهیار نسبت به سایر نمونه‌ها برتری دارد. همچنین از یک سو وجود مواد آلی که بیشتر شامل ترکیبات کربنی پیچیده حاصل از بقایای گیاهی و حیوانی در ترکیب خاک است، برای تهیه مصالح خاکی مورد استفاده در ساخت و ساز مضر می‌باشد و موجب تغییر رنگ نامطلوب و کاهش مقاومت و دوام مصالح می‌گردد و از سوی دیگر حضور بیش از حد این مواد باعث اختلال در روند تثبیت خاک با مواد افزودنی می‌شود؛ بنابراین اندازه‌گیری و تعیین درصد مواد آلی در نمونه‌های خاکی که جهت تهیه مصالح خاکی به‌کار می‌رود از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. اندازه‌گیری درصد مواد آلی نمونه‌های خاک انتخابی، نشان‌دهنده آن بود که در میان چهار نمونه خاک مورد آزمایش، خاک مهیار کمترین درصد مواد آلی را دارا می‌باشد که این ویژگی نیز این خاک را نسبت به سایر نمونه‌ها برای تهیه مصالح خاکی متمایز و مناسب‌تر می‌گرداند. اندازه‌گیری میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها نشان داد که کمترین میزان هدایت الکتریکی را خاک منطقه سگزی دارد و خاک‌های منطقه سین و مهیار با هدایت الکتریکی نزدیک به یکدیگر در رتبه بعدی قرار می‌گیرند و بیشترین میزان هدایت الکتریکی را خاک منطقه محمودآباد نشان می‌دهد. هدایت الکتریکی خاک شاخصی از میزان شوری است و میزان شوری بالا نشان‌دهنده حضور میزان بالای نمک‌های محلول مضر در خاک می‌باشد که بر کیفیت ملات تأثیر و در نهایت موجب شوره زنی و نهان شکفتگی در سطح ملات شده و موجبات فرسایش و تخریب ملات را تحت تأثیر نوسانات رطوبت فراهم می آورد. 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 نمونه‌های خاک تهیه شده از مناطق مختلف، به‌نظر می‌رسد که خاک به‌دست آمده از دشت مهیار به‌دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بهتر نسبت با سایر نمونه‌ها برای تهیه ملات کاهگل مناسب‌تر می‌باشد.

تهیه کاهگل و مطالعه آزمایشگاهی آن

با توجه به اهمیت درصد الیاف کاه موجود در ترکیب 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 (تصویر شماره ۸) و پس از یک ساعت عمل‌آوری تحت همزدن دستی و ماندگاری برای قوام آمدن ملات، با استفاده از

قالب‌های آزمایشگاهی استاندارد، نمونه‌های لازم برای مطالعه آزمایشگاهی ملات کاهگل به شرح زیر تهیه شد:

۱- نمونه‌های مکعب مستطیل۳×۱۰×۱۰سانتیمتر برای بررسی وضع ظاهری و میزان ترک‌های سطحی ملات (تصویر شماره ۹).

۲- نمونه‌های نیم استوانه‌ای استاندارد به طول ۱۴ سانتیمتر برای اندازه‌گیری درصد انقباض خطی (تصویر شماره ۱۰).

۳ - نمونه‌های پاپیونی برای اندازه‌گیری مقاومت کششی (تصویر شماره ۱۱).

۴- نمونه‌های مکعبی ۵×۵×۵ سانتیمتر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری (تصویر شماره ۱۲).

نوع آزمایش	روش آزمایش	کد استاندارد
تعیین حد روانی خاک (LL)	دستگاه کاساگرانده	D4318-98 ASTM
تعیین حد خمیری خاک (PL)	روش فتیله کردن	D4318-98 ASTM
تعیین دامنه خمیری خاک (PI)	محاسبه اختلاف حد روانی و حد خمیری	D4318-98 ASTM
آزمایش دانه‌بندی خاک	الک و هیدرومتری	D422-87 ASTM
تعیین درصد رطوبت خاک	خشک کردن در آون	D4643-00 ASTM
تعیین چگالی ویژه خاک	استفاده از پیکنومتر	D854-02 ASTM
تعیین انقباض خطی خاک	استفاده از قالب و آون	BS 1377- Part 2
اندازه‌گیری pH خاک	روش پتانسیومتری	D4972 ASTM
اندازه‌گیری درصد مواد آلی خاک	استفاده از کوره	ASTM D2974
اندازه‌گیری هدایت الکتریکی خاک	استفاده از دستگاه هدایت سنج	D4972 ASTM

ج ۱. روش‌های مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های خاک.

نمونه خاک	سین	سگزی	محمودآباد	مهیار
حد روانی (LL)	۳۳/۲	۳۵/۹	۳۰/٤	۲۱/۵
حد خمیری (PL)	۱۸/۲	۱۷/۱	۱٦/۱	۱۲/۲
دامنه خمیری (PI)	۱۵	۱۸/۸	۱٤/۳	۹/۳
درصد رطوبت	۲/۰۱	۳/۱	۲/۳۹	۲/۳٤
درصد مواد آلی	۲/۷۹	۳/۸۹	۲/۹٦	۱/۷۱
چگالی ویژه Gs	۲/۲۷	۲/۲۲	۲/۷	۲/٦۹
درصد انقباض خطی (Ls)	۸/٦۸	۹/۲۹	۸/۵۵	٦/۰۹
pH	۸/۰٦	۷/۷۵	۷/۸۳	۷/۸۱
هدایت الکتریکی (EC)به mS/Cm	۱	۰/۸۸	۱/۹۵	۱/۱۳
درصد شن	۰/۱۹	۰	۰/۹۸	۰/۹۲
درصد ماسه	۸۹/۱۷	۸٦/۰۲	۸۷/۰۸	۸۰/٤٤
درصد لای	۱۰/٦۵	۱۳/۹۸	۱۱/۹٤	۱۸/٦۵
درصد رس	۵/۱۵	۸/۱۰	۳/۹٦	٤/٦۳
D_{10}	۰/۰۰٦	۰/۰۰۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷
D_{30}	۰/۱۵٤	۰/۱۳۲	۰/۱۵۱	۰/۱۱۱
D_{60}	۰/٤۱۲	۰/۵۳۲	۰/۳۷۳	۰/۳۹۷
Cc	۱۰/۱۹	۱۰/۱۳	٤/٦۳	٤/۲۵
C_U	۷۳/۰۳	۱٦۳/٦۲	۲۸/٤٦	۵٤/۲۱
طبقه‌بندی خاک آشتو	A-2-6(0)	A-2-6(0)	A-2-6(0)	A-2-4(0)
طبقه‌بندی خاک متحد	SC- Clayey Sand	SC- Clayey Sand	SC- Clayey Sand	SC- Clayey Sand

ج ۲. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های خاک.

ت ۸. نمونه‌های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه. مأخذ: نگارنده.

ت ۹. نمونه‌های کاهگل مکعب مستطیل. مأخذ: نگارنده.

ت ۱۰. نمونه‌های کاهگل نیم استوانه‌ای برای تعیین انقباض خطی. مأخذ: نگارنده.

ت ۱۱. نمونه‌های کاهگل پاپیونی برای تعیین مقاومت کششی. مأخذ: نگارنده.

ت ۱۲. نمونه‌های کاهگل مکعبی برای تعیین مقاومت فشاری. مأخذ: نگارنده.

در تهیه تمامی نمونه های آزمایشگاهی ملات کاهگل، در این مرحله، شرایط تهیه ملات، نحوه عمل‌آوری، مدت زمان عمل آوری، نوع الیاف کاه مورد استفاده، آب مصرفی، نوع و بافت خاک انتخابی یکسان در نظر گرفته شد و تنها متغیر مورد مطالعه درصد وزنی الیاف کاه مورد استفاده در ترکیب ملات کاهگل بود.

برای بررسی مقاومت فشاری ملات، ۳ نمونه مکعبی و برای تعیین مقاومت کششی ملات از هر ترکیب، ٦ نمونه پاپیونی تهیه شد. میزان تراکم و فشردگی ملات در داخل قالب‌ها، هنگام قالب‌گیری، با توزین و یکسان نمودن وزن ملات درون هر یک از قالب‌ها و استفاده از مقدار آب یکسان برای تهیه ملات در هریک از نسبت ترکیب‌های انتخابی، کنترل شد تا شرایط

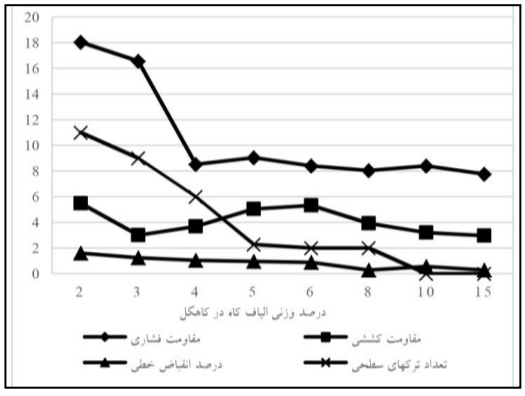
آزمایشگاهی نمونه‌ها همسان گردد. برای خشک کردن تدریجی نمونه‌های ملات، با شرایط یکسان و جلوگیری از ترک خوردن آن‌ها در هنگام خشک شدن، ابتدا تمامی نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در سایه، در محیط آزمایشگاه قرار داده شد، تا به آرامی رطوبت سطحی نمونه‌ها کاهش یافته و اندکی خشک شوند، سپس نمونه‌های کاهگل به مدت ۲٤ ساعت در آون در دمای ٦٥ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا تقریباً خشک شوند و در مرحله پایانی برای خشک شدن کامل آن‌ها، ۲٤ ساعت دیگر نمونه‌ها در آون با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. پس از خروج نمونه‌ها از قالب و توزین مجدد، تمامی آن‌ها به مدت ۱٤ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری شد و پس از رسیدن سن نمونه‌ها به ۱٤ روز، مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن‌ها اندازه‌گیری شد (تصاویر شماره ۱۵-۱۳).

بررسی نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه حاکی از آن است که با افزایش درصد الیاف کاه در ترکیب کاهگل، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز به‌دلیل کاهش ذرات خاک درگیر با الیاف به تدریج کاهش می‌یابد. هنگامی که درصد الیاف کاه در ملات از ۲ درصد وزنی به ٤ درصد می رسد افت شدیدی در مقاومت فشاری ملات کاهگل مشاهده می‌شود، به‌طوری که در نمودار مقاومت فشاری نسبت به درصد الیاف کاه نیز مقاومت فشاری کاهگل با شیب بسیار تندی سقوط می‌نماید ولی این افت مقاومت فشاری پس از رسیدن درصد الیاف کاه در کاهگل به ٤ درصد تقریباً ثابت باقی می‌ماند و تنها زمانی که میزان الیاف کاه به ۱۵ درصد افزایش می‌یابد، مجدداً شاهد یک افت قابل ملاحظه در میزان مقاومت فشاری کاهگل هستیم. بررسی مقاومت کششی نمونه ها نشان‌دهنده آن است که با افزایش درصد الیاف کاه تا ٦ درصد، مقاومت کششی نمونه ها با شیب ملایمی به تدریج افزایش می‌یابد ولی بعد از آن با افزایش درصد وزنی الیاف کاه از ٦ به ۱۵ درصد وزنی، میزان مقاومت کششی نمونه‌های کاهگل به تدریج باشیب ملایمی کم می‌شود. اندازه‌گیری انقباض خطی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف الیاف کاه نشان داد که با افزایش درصد الیاف، 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. به‌علاوه با افزایش درصد الیاف کاه در نمونه‌ها، وضعیت ظاهری آن‌ها نیز تغییر می‌کند، به طوری که با افزایش درصد کاه میزان استحکام و انسجام نمونه‌ها کاهش و سطح آن‌ها به تدریج صافی و یکدستی خود را به دلیل افزایش درصد الیاف ازدست داده و ناصاف و زمخت می‌گردد. با توجه به نتایج فوق به‌نظر 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 و مقاومت کششی کاهگل در حد قابل‌قبولی است، ضمن آن که میزان انقباض و ترک خوردگی سطح نمونه‌ها اندک است و علاوه بر این کاهگل از انسجام و استحکام ظاهری خوبی برخوردار بوده و سطح صاف و یکدستی دارد (نمودار شماره ۵ و جدول شماره ۳).

ت ۱۳. تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها با بریکت.
مأخذ: نگارنده.

ت ١٤. اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل مکعبی. مأخذ: نگارنده.

ت ١٥. گسیختگی نمونه کاهگل پاپیونی در دستگاه بریکت. مأخذ: نگارنده.



ن ٥. نتایج آزمایش نمونه‌های کاهگل با درصدهای مختلف الیاف کاه.

بررسی مدت زمان عمل‌آوری ملات کاهگل

به‌منظور مطالعه تأثیر مدت زمان عمل‌آوری ملات کاهگل بر خواص مکانیکی آن، نمونه‌هایی از ملات کاهگل با ٥ درصد وزنی الیاف کاه و مدت زمان‌های مختلف عمل‌آوری از ١ ساعت تا ٢١ شبانه روز تهیه و مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن‌ها، پس از خشک شدن در سن ١٤ روز، ارزیابی شد تا تأثیر مدت زمان عمل‌آوری به‌عنوان متغیر مورد مطالعه مشخص گردد که نتایج آن در جدول شماره ٤ و نمودار شماره ٦ مندرج است.

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از این مطالعات حاکی از آن است که طول مدت زمان عمل‌آوری در ملات کاهگل تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی آن دارد، به‌طوری‌که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری تا ٢٤٠ ساعت (١٠ شبانه روز)، مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات کاهگل به تدریج با شیب ملایمی افزایش می‌یابد ولی پس از گذشت ٢٤٠ساعت، به‌دلیل پوسیدگی شدید الیاف گیاهی کاه موجود در ملات کاهگل، میزان مقاومت مکانیکی آن افت کرده و کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزایش مدت زمان عمل‌آوری بر ارتقای مقاومت فشاری کاهگل و به تبع آن، دوام و استحکام ملات حاصل، تأثیر بیشتری دارد تا مقاومت کششی ملات، زیرا هر چند افزایش مدت زمان عمل‌آوری موجب بهبود مقاومت کششی ملات کاهگل شده است ولی این افزایش بسیار تدریجی و اندک است و همان طوری‌که در نمودار شماره ٦ مشاهده می‌شود، افزایش مقاومت کششی ملات با شیب بسیار ملایمی خود را نشان داده است ولی با گذشت ٤٨ ساعت از مدت زمان عمل‌آوری ملات کاهگل، میزان مقاومت فشاری ملات به‌طور محسوسی تا ٥٨ درصد افزایش یافته است و بعد از آن،

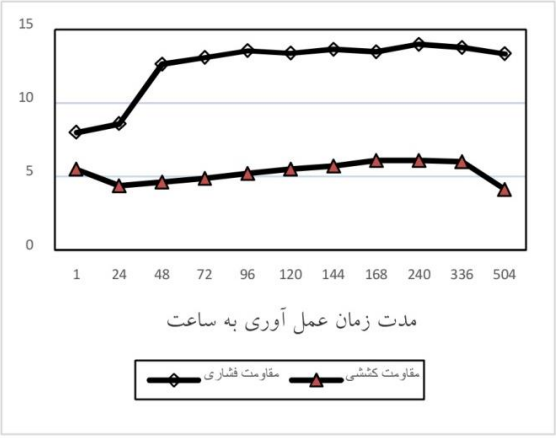
این افزایش با شیب ملایمی تـا گذشـت ۲۴۰ساعت از زمان عمل‌آوری، همچنـان ادامـه مـی‌یابـد ولـی میـزان افزایش آن در این مرحله، نسبت بـه مرحلـه قبـل، تنهـا افزایشی حدود ۷/۱۰ درصد را نشان می‌دهد.

نمونه کاهگل	CW2h1	CW3h1	CW4h1	CW5h1	CW6h1	CW8h1	CW10h1	CW15h1
نوع خاک	خاک منطقه ٤	خاک منطقه ٤	خاک منطقه ٤	خاک منطقه ٤	خاک منطقه ٤	خاک منطقه ٤	خاک منطقه ٤	خاک منطقه ٤
درصد وزنی کاه	۲	۳	٤	۵	٦	۸	۱۰	۱۵
مقاومت فشاری Kg/Cm^2	۰٤/۱۸	۵٦/۱٦	۵۳/۸	۰۵/۹	٤/۸	۰٦/۸	٤/۸	۷۵/۷
مقاومت کششی Kg/Cm^2	٤۹/۵	۳	٦۷/۳	۰٤/۵	۳۱/۵	۹٤/۳	۲/۳	۹۵/۲
درصد انقباض خطی	٦/۱	۲۵/۱	۱	۹۵/۰	۹/۰	۳/۰	۵۵۰	۳/۰
وضعیت ظاهری	بسیار مستحکم و منسجم و سنگین	بسیار مستحکم و منسجم و سنگین	مستحکم، منسجم و سنگین	مستحکم، منسجم و نسبتاً سنگین	نسبتاً مستحکم، منسجم و سنگین	تا حدی مستحکم، منسجم و سبک	با استحکام و انسجام کم و بسیار سبک	فاقد استحکام و انسجام و بسیار سبک
وضعیت سطحی	بسیار صاف و یکدست	بسیار صاف و یکدست	صاف و یکدست	صاف و یکدست	نسبتاً یکدست و کمی زمخت	تا حدی یکدست و زمخت	تا حدی یکدست و زمخت	بسیار زمخت و ناصاف
میانگین تعداد ترک‌های سطحی	۱۱	۹	٦	۲/۳	۲	۲	صفر	صفر

ج ۳. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های گاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه.

کد کاهگل	نوع خاک	درصد کاه	مدت عمل‌آوری	مقاومت فشاری	مقاومت کششی
CW51h	٤	۵	۱ ساعت	۸	٤۹/۵
CW51d	٤	۵	۲٤ ساعت	۵۹/۸	۳۸/٤
CW52d	٤	۵	٤۸ ساعت	٦٤/۱۲	٦۳/٤
CW53d	٤	۵	۷۲ ساعت	۰۹/۱۳	۸۷/٤
CW54d	٤	۵	٤ شبانه روز	۵۵/۱۳	۲۱/۵
CW55d	٤	۵	۵ شبانه روز	۳۹/۱۳	۵۱/۵
CW56d	٤	۵	٦ شبانه روز	٦۵/۱۳	۷۱/۵
CW57d	٤	۵	۷ شبانه روز	٤۸/۱۳	۱۱/٦
CW510d	٤	۵	۱۰ شبانه روز	۱٤	۱/٦
CW514d	٤	۵	۱٤ شبانه روز	۷۹/۱۳	٦
CW521d	٤	۵	۲۱ شبانه روز	۳٤/۱۳	۱۳/٤

ج ٤. نتایج بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های کاهگل با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت.



ن ٦. مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت.

نتیجه

بررسی و مطالعه خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل و تأثیر ترکیب و مدت زمان عمل‌آوری بر خواص آن نشان داد:

۱- مناسب‌ترین نسبت ترکیب در ملات کاهگل، استفاده از ۵-٤ درصد الیاف کاه در ترکیب این ملات است، زیرا علاوه بر داشتن مقاومت فشاری و مقاومت کششی مناسب، میزان انقباض و ترک‌خوردگی ملات نیز در این نسبت ترکیب، پایین بوده و ملات حاصل، استحکام، انسجام و یکدستی مناسبی دارد.

۲- طول مدت زمان عمل‌آوری تأثیر به‌سزایی بر کیفیت ملات کاهگل دارد، به‌طوری‌که با افزایش مدت زمان عمل آوری خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل، از جمله مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن، بهبود یافته و ارتقاء می‌یابد.

۳- با توجه به افزایش ۵۸ درصدی مقاومت فشاری ملات کاهگل پس از ٤۸ ساعت عمل آوری به نظر می‌رسد که برای دستیابی به کاهگلی با کیفیت مناسب، بایستی حداقل، ملات کاهگل به مدت ٤۸ ساعت جهت عمل‌آوری در معرض رطوبت قرار گیرد و سپس استفاده شود.

٤- با توجه به افت خواص مکانیکی ملات کاهگل و کاهش مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات پس از گذشت ۲٤۰ ساعت (۱۰ شبانه روز) عمل آوری، به دلیل پوسیدگی شدید الیاف گیاهی کاه موجود در ملات، به‌نظر می‌رسد که حداکثر مدت زمان عمل‌آوری و ماندگاری ملات کاهگل ۲٤۰ ساعت است.

۵- مناسب‌ترین محدوده زمانی قابل ارائه برای عمل‌آوری ملات کاهگل ۱٦۸-۷۲ ساعت (۷-۳ شبانه روز) می‌باشد.

پیشنهادهایی برای مطالعات آینده

با توجه به قابلیت‌ها و اهمیت استفاده از مصالح خاکی سنتی همچون خشت و کاهگل در معماری و حفاظت و مرمت ابنیه تاریخی و فرهنگی، تلاش برای بهسازی و توانمندسازی مصالح فوق با حفظ اصالت‌های فرهنگی آن به‌منظور احیاء و توسعه کاربرد این مصالح در معماری شهری و روستایی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در راستای تحقیق انجام شده بر روی کاهگل پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آتی، با توجه به کارکرد اصلی اندود کاهگل به‌عنوان عایق رطوبتی در بناهای خشت و گلی و ضعف شدید این اندود سنتی در مقابل رطوبت و بارندگی، تأثیر درصد الیاف کاه در ترکیب کاهگل و همچنین مدت زمان عمل‌آوری، بر دوام این اندود سنتی تحت تأثیر بارندگی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد علاوه بر این ضروری است تا روش‌های مناسب بهسازی و افزایش دوام کاهگل با استفاده از افزودنی‌های مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد تا به‌توان با استفاده از مواد افزودنی مناسب، کارآمد و مقرون به‌صرفه دوام و طول عمر اندود کاهگل را در مقابل فرسایش ناشی از عوامل

محیطی، به‌ویژه رطوبت بارندگی افزایش داد. شناخت مکانیسم‌های شیمیایی که موجب عمل‌آوری و بهبود خواص کاهگل در طی ماندگاری آن تحت رطوبت می‌شود، بایستی در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار گیرد. بررسی تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر عملکرد الیاف کاه در ترکیب ملات کاهگل و تأثیر درصد ماسه خاک مورد استفاده در افزایش و یا کاهش مقدار کاه مورد نیاز برای تهیه کاهگل و نحوه و مدت زمان عمل‌آوری ملات از دیگر موارد پیشنهادی است که می‌تواند در مطالعات آتی مد نظر قرار گیرد.

پی‌نوشت

1.CRAterre (International Centre on Earthen Architecture)
2. Grenoble
3. UNESCO, سازمان علمی، فرهنگی و تربیتی ملل متحد
4. ASTM
5.American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
6. British Standards Institute (BS)

فهرست منابع

– ابراهیم‌زاده حسن‌آبادی، سیامک. (۱۳۹۰)، شناخت مواد و مصالح ساختمانی، چاپ اول، تهران: نشر سیمای دانش.
– بزرگمهری، زهره. (۱۳۸۱)، مصالح ساختمانی(آژند، اندود، امود)، چاپ اول، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.
– تقوایی، حسن. (۱۳۸۵)، «پایداری منظر و بوم در مناطق گرم و خشک و کویری ایران»، همایش علمی منطقه‌ای معماری کویر، ۱۴–۱، اردستان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان.
– خدابنده، ناهید، ماجدی‌اردکانی، محمدحسین ؛ ویسه، سهراب. (۱۳۷۹)، مصالح بنایی با استفاده از خاک، گچ، آهک و مخلوط‌های آن‌ها در ایران، بخش دوم، چاپ اول، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
– دوتیه، ژان. (۱۳۸۵)، معماری با خاک، ترجمه محمد احمدی‌نژاد، چاپ اول، اصفهان: خاک.
– رحیم‌نیا، رضا. (۱۳۹۲)، «بازشناخت تجربیات معماری بومی در جنوب خراسان جهت حفاظت و مرمت معماری خشتی»، فصلنامه مسکن و محیط روستا، دوره ۳۲، شماره ۱۴۲، ۳۲–۱۹.
– رضازاده اردبیلی، مجتبی. (۱۳۹۰)، مرمت آثار معماری شناخت، آسیب‌شناسی، فن‌شناسی، چاپ اول، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
– رهبر، داود. (۱۳۸۱)، اطلس ملی ایران، چاپ اول، تهران: سازمان نقشه برداری کشور.
– حاجی ابراهیم زرگر، اکبر. (۱۳۷۸)، درآمدی بر شناخت معماری روستایی ایران، چاپ اول، تهران: دانشگاه شهید بهشتی.
– زمرشیدی، حسین. (۱۳۷۷)، معماری ایران مصالح‌شناسی سنتی، چاپ اول، تهران: نشر زمرد.
– عالی، حسین. (۱۳۹۳)، روش های اجرایی ساختمان‌سازی از سنتی تا پیشرفته، چاپ اول، تهران: جهان جام جم.
– فرخ‌یار، حسین. (۱۳۸۷)، بناهای سنتی (اجرا، عملکرد، خصوصیت، مرمت)، چاپ دوم، تهران: بهمن آرا.
– ماجدی اردکانی، محمد حسین. (۱۳۸۳)، «خرابیهای متداول ساختمان‌های خشتی و روش مرمت آن‌ها»، مجموعه مقالات سومین همایش حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی و تزئینات وابسته به معماری، ۱۵۸–۱۴۸، تهران: نشر اداره کل آموزش و انتشارات سازمان میراث فرهنگی کشور.
– ماریانی، لوکا. (۱۳۷۵)، بازپیرایی در دهانه‌غلامان و کوه خواجه، ترجمه سید احمد موسوی، چاپ اول، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.
– مرادی، حمید رضا؛ فاضل‌پور، محمدرضا؛ صادقی، سید حمید رضا؛ حسینی، سیدزین‌العابدین. (۱۳۸۷)، «بررسی تغییر کاربری اراضی در بیابان‌زدایی محدوده‌ی شهر اردکان با استفاده از سنجش از دور»، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۱۵، شماره ۱، ۱۲–۱.
– محب علی، محمدحسن؛ مرادی، علی‌اصغر.(۱۳۹۳)، دوازده درس مرمت، چاپ چهارم. تهران: وزارت مسکن و شهرسازی.
مرکز آمار ایران (۱۳۹۰)؛ سالنامه آماری کشور، چاپ اول، تهران: مرکز آمار ایران.
– مینکه، گرنوت. (۱۳۸۸)، راهنمای ساخت و ساز با خاک، کاربرد مصالح خاکی در معماری مدرن، ترجمه شاهین طلوع آشتیانی، چاپ اول، تهران: اداره کل روابط عمومی سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری.
– نگارش، حسین؛ فلاح فیروزآباد، حسن؛ خسروی، محمود. (۱۳۹۰)، «تجزیه و تحلیل ناهنجاری‌های اقلیمی موثر بر فرآیند

بیابان‌زایی در منطقه خضرآباد یزد»، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۲، شماره ۳، ۹۴-۶۹.

– وارن، جان.(۱۳۸۵)، حفاظت سازه‌های گلین، ترجمه مهـرداد وحدتی، چاپ اول، تهران: رسانه پرداز.

- Adam, E. A. & Agib, A. R. A, (2001), Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan, Printed by Graphoprint for the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. France, Paris, UNESCO.

- Alva balderrame, Alejandro. (2001). "Earthen architecture", the Getty conservation institute Newsletter, 16(1), Los Angeles.

- Anger, R., Fontaine, L., Joffroy, T., & Ruiz, E. (2011), "Earthen construction, an other way to house the planet", Private Sector & Development, (10), 18-21.

- Craterre, (2015), Earthen architecture around the world, CRAterre, http://www.craterre.org/?new_lang=en_GB, (accessed: March 12, 2015).

- 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.

- Gandreau, D, Delboy, L, (2010), Patrimoine mondial, Inventaire et situation des biens construits en terre, sous la direction de: Joffroy, T., CRAterre-ENSAG, UNESCO/CH/CPM, Paris.

- Houben, Hugo; Guillaud, Hubert. (1994). Earth Construction: A Comprehensive Guide, Intermediate technology Publications, London.

- Keefe, L. (2005). Earth building: methods and materials, repair and conservation, Taylor & Francis, London and New York.

- 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.

- Maravelaki-Kalaitzaki, P. (2007). Hydraulic lime mortars with siloxane for waterproofing historic masonry. Cement and Concrete Research 37, 283-290.

- Matero, F. G. (1999). The conservation of plasters in earthern archeological sites. CRM Cultural resource management, 22(6), 59-62.

- Morris, J. & Booysen, Q, (2000), "Earth construction in Africa", Proceedings: strategies for a sustainable Built Environment, Pretoria, 23-25 August.

- Pieris. S, (1993), "Earthen architecture", International scientific committee, ICOMOS, Seri Lanka.

- Rastorfer, D. (1985), the man and his work. Hassan Fathy, a Mimar Book, Concept Media, Singapore, Architectural Press, London.

- 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.

- 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.

- Zami, M. S., & Lee, A. (2011). "Using earth as a building material for sustainable low cost housing in Zimbabwe", The Built & Human Environment Review, 1, 40-55.