

مسکن و محظوظ

شماره ۱۵۷ ♦ بهار ۹۶ ♦

# تأثیر مدت زمان عمل آوری ملات سنتی کاهگل

## بر مقاومت فشاری و کششی آن

مسعود باتر \*، حسین احمدی \*\*، جهانگیر عابدی کوپایی \*\*\*، رحمت‌الله عمامدی \*\*\*\*

۱۳۹۴/۰۲/۰۷

۱۳۹۴/۱۱/۰۶

تاریخ دریافت مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

### چکیده

استفاده از خاک و مصالح خاکی، به دلیل ارزانی، فراوانی و سهولت دسترسی به آن در بیشتر مناطق جهان، از گذشته‌های دور تاکنون به ویژه 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 فوق العاده عمل آوری صحیح مصالح، به ویژه ملات‌ها و اندودهای ساختمانی جدید، کاملاً شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته است ولی تاکنون تحقیقی در این زمینه بر روی تأثیر روش عمل آوری 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 عمل آوری کاهگل بر خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی این ملات سنتی و کهن با استفاده از روش‌های تجربی است و تلاش برای یافتن پاسخ این سوال که مدت زمان عمل آوری کاهگل، چه تأثیری بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات دارد؟ و مناسب‌ترین مدت زمان عمل آوری این ملات برای دستیابی به مقاومت موردنظر 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 عمل آوری، 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 عمل آوری، این افزایش با آهنگ ملایمی تا ۱۰ شباه روز ادامه می‌یابد. بررسی‌های تجربی انجام شده همچنین حاکی از آن است که مناسب‌ترین محدوده زمانی برای عمل آوری کاهگل ۷-۳ شباه روز می‌باشد.

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

\* مربي 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 دارد و هنوز هم در کشورهای در حال توسعه، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.(Pieris, 1993:28; Morris, & Booyse, 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 به‌طوری که امروزه برآورده می‌شود حدود ۳۰ درصد از جمعیت جهان؛ یعنی تقریباً ۱/۵-۱/۷ میلیارد نفر در خانه‌های ساخته شده از مصالح خشک 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<sup>۱</sup>، مرکز بین‌المللی معماری خشت و گلی در گرانوبل<sup>۲</sup> 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 بین‌المللی یونسکو<sup>۳</sup>، ۱۰-۱۵ 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 به‌طوری که 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 می‌شود: نخست، روش‌های 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 ساختمان‌های خشتی، زیرسازی آستر گچی و آبیندی پشت‌بام ساختمان‌های روستایی به کار 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 ابینه و بافت تاریخی، در مناطق گرم و خشک ایران با آن،

بیولوژیک ایجاد می نمایند. بدین ترتیب حتی در صورت آسیب دیدن اندوده، به سادگی می توان آنرا تجدید نمود، چون همواره تجدید اندودها، آسانتر از تجدید ساختار خود بناست (Matero, 1999). بهمین خاطر است که چه در داخل و چه در خارج بنا، اندودها سطحی را تشکیل می دهند که در زمان حیات بنا، پس از هر بار فرسودگی، بیوسته و به طور دوره ای، بارها تجدید شده اند. برای تهیه کاهگل، پس از تهیه خاک مناسب و اختلاط آن با درصد مناسبی الیاف کاه گنم، آنرا به صورت آخوره درآورده و سپس بر روی آن آب می بندند و پس از گذشت مدتی و خیس خوردن ذرات خاک و الیاف کاه، بالگد کردن آن توسط نیروی انسانی، ملات کاهگل را به خوبی ورز می دهند تا خاک، الیاف کاه و آب جذب شده توسط آنها به خوبی با یکدیگر درآمیزد، ضمن آن که ورز دادن گل، موجب می شود، حباب های 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 می دهند 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 می شود تا کاهگل کاملاً همگن و یکدست شده و برای استفاده و اندوود نمودن نما و پشت بام ساختمان آماده و مهیا شود (تصاویر شماره ۱-۷).

برای عمل آوری ملات کاهگل، معمولاً رهاسازی آن تحت رطوبت، چند روز طول می کشد تا در طی این مدت دانه های خاک و الیاف کاه کاملاً خیس خورده و از یکدیگر باز شوند (Maheri, et all, 2011: 352) (ماریانی، ۱۳۷۵: ۱۸؛ زمرشیدی، ۱۳۷۷: ۱۲۷؛ فرخ یار، ۱۳۸۷: ۱۶۵؛ زرگر، ۱۳۹۰: ۲۱۳؛ رضازاده اردبیلی، ۱۳۹۰: ۱۶۴؛ عالی، ۱۳۹۳: ۵۶).

پوشش داده شده است. در واقع، اندوود کاهگل، بخش جدایی ناپذیری از هویت معماری کشور ما در بسیاری از بنایهای تاریخی شهری و روستایی است (Maheri, et al, 2011:350). قابلیت ها و خصوصیات ویژه حفاظتی اندوود کاهگل از جمله سهولت کاربرد آن در اینیه و بافت تاریخی، در دسترس بودن، صرفه اقتصادی، قابلیت بازگشت به طبیعت و همخوانی با ساختار اینیه خشت و گلی موجب شده است که به عنوان یک پوشش حفاظتی سنتی در بسیاری از بنایهای تاریخی و محوطه های باستانی مورد استفاده قرار گیرد، به گونه ای که استفاده از آنرا به طور وسیع و گسترده در بسیاری اینیه 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 گذشته های دور، کاهگل به عنوان یک پوشش حفاظتی، برای پوشش سطوح خارجی بنا و نیز عایق بندی پشت بام در مقابل رطوبت و بارندگی به کار می رفته است، علاوه بر این، استفاده از یک لایه اندوود کاهگل به ضخامت ۳-۵ سانتیمتر در سطح خارجی بنا، دارای خاصیت عایق حرارتی نیز می باشد (Maheri, 2011:350 et al, ) که در محافظت ساختمان ها، به ویژه در مناطق گرم و خشک در مقابل تغییرات شدید دما، بسیار مهم و حیاتی بوده است، به طوری که امروزه، هنوز هم در بسیاری از نقاط جهان، به ویژه در مناطق روستایی، از جمله خاورمیانه، آسیای مرکزی، آفریقا و آمریکای مرکزی و جنوبی از اندوود کاهگل برای عایق بندی، ضدآب نمودن و حفاظت از ساختمان های خشت و گلی استفاده می شود. اندودها، یک لایه حفاظتی برای ساختمان، در مقابل حملات خارجی همچون نفوذ رطوبت، سایش و عوامل



ت ۴. خوابانیدن کاهگل برای عمل آوری.  
مأخذ: نگارنده.



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



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



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



ت ۶. اندود کردن نمای بنا با کاهگل.  
مأخذ: نگارنده.



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

رحمیم‌نیا، ۱۳۹۲: ۲۹) ولی شماری نیز معتقدند که عمل آوری ملات کاهگل به زمان بیشتری نیازمند است و لزوم ماندگاری ملات کاهگلی که برای اندودکاری در عماری سنتی به کار می‌رود را به مدت ۱۵ روز تحت رطوبت و وزد دادن گوشزد می‌نمایند (بزرگمهری، ۱۳۸۱: ۱۵۷؛ مرادی و محب‌علی، ۱۳۹۳: ۴۲). در مقابل این افراط و تفریط، بعضی از منابع، حد میانگین این دو زمان را برای عمل آوری ملات کاهگل کافی دانسته و اعتقاد دارند که این ملات، بایستی یک هفته به حال خود رها شود تا عمل بیاید (ابراهیم‌زاده حسن‌آبادی، ۱۳۹۰: ۱۲۳)، از سوی دیگر، چندی از محققین و متخصصان نیز

زمان مشخصی را برای عمل آوری ملات کاهگل ذکر نکرده و فقط اشاره‌ای دارند مبنی بر این که کاهگل بایستی برای عمل آوری چند روز تحت رطوبت به حال خود رها (زرگر، ۱۳۹۰: ۲۱۳؛ Maher, et all, 2011: 352) شود

با وجود کاربرد وسیع و گستردگی اندود کاهگل در اینیه سنتی و تاریخی، این اندود از معایبی نیز برخوردار است که موجب شده استفاده از آن به تدریج در عماری دوران معاصر، تقریباً منسوخ شده و استفاده از آن به عنوان یک پوشش حفاظتی برای محافظت میراث عماری 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 وارتفگی 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.

به دلیل معایبی که اندود کاهگل داشته، در سالیان اخیر به تدریج در بیشتر نواحی گرم و خشک، به خصوص در مناطق شهری و بسیاری از مناطق روستایی برای عایق‌بندی بنا، به‌ویژه پشت بام، اندود قیر جایگزین



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

مدت زمانی که برای عمل آوری 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 عمل آوری کاهگل، معیار و دلیلی اقامه نشده است. آن چه که در بیشتر منابع مشاهده می‌شود، تنها تأکید بر اهمیت عمل آوری کاهگل با ماندگاری آن تحت رطوبت برای قوام بهتر ملات است. از سوی دیگر، مدت زمانی که برای عمل آوری در منابع مختلف برای ملات کاهگل ارائه شده از ۲۴ ساعت تا ۱۵ شبانه روز متفاوت است.

ماریانی در گزارش خود از عملیات مرمت و بازپیرایی دهانه غلامان 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 عمل آوری کافی می‌داند (ماریانی، ۱۳۷۵: ۱۸). گروهی نیز برای عمل آوری ملات کاهگل معتقدند که ملات جهت عمل آمدن، بایستی ۲–۳ روز به حال خود رها شود تا قوام آید (زمرشیدی، ۱۳۷۷: ۱۲۷؛ فرخیار، ۱۳۸۷: ۱۶۵؛ رضازاده اردبیلی، ۱۳۹۰: ۱۶۴)

کاهگل شده است. استفاده از قیر به جای اندواد 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 کمرنگ خشک جهان قرار دارد (تقوایی، ۱۳۸۵: ۲؛ مرادی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱؛ نگارش، 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: ۶؛ مرادی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱). به علاوه، قیر در مقابل بخار آب نیز نفوذناپذیر است که توجه به این نکته مهم از اهمیت بهسازی بروخوردار است. در مقایسه با قیر، اندواد 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).

برای عایق‌بندی رطوبتی بنا، نسبت به بخار آب و انتقال آن از میان دیوارهای بنا به بیرون، از طریق خلل و فرج موجود در مصالح و اندواد، طبق قاعده لوله‌های مویین در هنگام کاهش رطوبت و افزایش دما و امکان تنفس، به‌ویژه در اینیه خشت و گلی بسیار لازم و ضروری

است، (Maravelaki-Kalaitzaki, 2007). زیرا ممانعت از عبور بخار آب و انتقال و جایه‌جایی نمک‌های محلول به‌وسیله هر نوع مانع و سدی و عدم امکان تنفس در بنا موجب حبس رطوبت و فعل شدن نمک‌های محلول در حضور رطوبت می‌شود که نتیجه آن تبلور نمک‌های محلول و ایجاد آسیب‌های جدی به صورت نهان‌شکفتگی و شوره‌زنی در مصالح است که موجبات فرسایش شدید بدنه بناهای خشت و گلی را فراهم می‌آورد.

با وجود معایبی که اندواد 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 اندواد کاهگل برای حفاظت آن، در مقابل رطوبت و بارندگی، از اهمیت بهسازی بروخوردار است چون بدین ترتیب، ساختارهای خشتشی 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 محل مخل محیطی است، به تدریج فرسایش یافته و قابلیت عایق‌بندی و حفاظتی خود را از دست می‌دهد. به‌همین خاطر بعد از ۱-۲ سال، بایستی اندواد کاهگل تجدید شود. به‌همین خاطر در بیشتر مناطقی که معماری خشت و گلی مرسوم است، معمولاً طبق سنت، هرساله، اندواد گلی نمای ساختمان و پشت بام آن، بعد از فصل بارندگی، دوباره تجدید و مرمت می‌شود (دوتیه، ۱۳۸۵: ۷). در واقع، این اندواد، یک پوشش حفاظتی فدا شونده است که برای محافظت از ساختار اصلی بنا که حساس، ضعیف و آسیب‌پذیر است، به کار می‌رود.

قابلیت‌های نهفته موجود در اندواد کاهگل و تجربیات استفاده از آن در حفاظت بناهای تاریخی خشتی نشان می‌دهد که می‌توان از آن، به عنوان یک پوشش عایق

و مکانیسم بهبود خواص ملات کاهگل تحت تأثیر این شیوه عمل آوری 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 عمل آوری 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 عماران 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 عمل آوری ملات کاهگل و ماندگاری آن بر بهبود خواص این ملات سنتی مثبت است ولی تاکنون هیچگاه به طور 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 فوق العاده آن در معماری و مسکن‌سازی بهویژه در مناطق روستایی و حفاظت و مرمت بنای‌ها 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 عمل آوری بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل چیست؟
- ۲- تأثیر زمان عمل آوری و ماندگاری ملات کاهگل بر دو شاخص مهم مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات چگونه است؟

مناسب برای حفاظت ساختارهای معماری خشت و گلی استفاده نمود ولی لزوم تجدید دائمی این اندواد، 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 تثیت خاک، حاکی از آن است که با استفاده از برخی از مواد افزودنی می‌توان، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و صالح خاکی، همچون کاهگل را بهبود و ارتقاء بخشد. بنابراین با توجه به لزوم تجدید دائمی اندواد کاهگل نما و بام اینه تاریخی خشت و گلی جهت حفاظت آن در مقابل عوامل آسیب‌رسان محیطی بهویژه رطوبت و بارندگی، مطالعه برای یافتن راه حل‌های علمی مناسب به منظور افزایش دوام و طول عمر مفید اندواد کاهگل بسیار لازم و ضروری به نظر می‌رسد و توجه به این ملات سنتی کهن و تلاش برای احیای آن از اهمیت بسیاری برخوردار است.

### طرح مسئله

امروزه اهمیت مرحله عمل آوری 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 عمل آوری بر خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل انجام نشده است.

در ادبیات مکتوب و تجربیات شفاهی موجود در میان عماران سنتی ایران، متداول‌ترین روش برای عمل آوری ملات کاهگل، ورز دادن مداوم ملات از طریق لگد کردن آن به وسیله 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. به علاوه، درباره نحوه تأثیر

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

### روش تحقیق

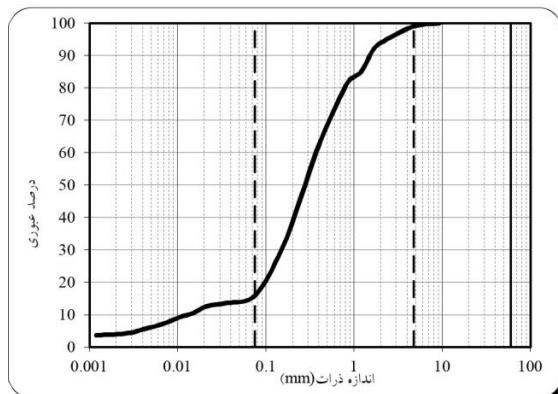
این تحقیق به روش تجربی، با مطالعات آزمایشگاهی بر روی ملات کاهگل به منظور دستیابی به اهمیت و تأثیر مدت زمان و نحوه عمل آوری این ملات سنتی و کهن بر بهبود خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی آن به ویژه مقاومت فشاری و کششی ملات کاهگل انجام شده است. برای این منظور پس از مطالعه کتابخانه‌ای و بررسی میدانی خاک مناطق مختلف شهرستان اصفهان و حومه آن، از ۴ منطقه مختلف در اطراف اصفهان که مطالعات و مشاهدات بصری کیفیت آنها را برای تهیه مصالح خاکی تأیید می‌نمود، به طور 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 عمل آوری 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 عمل آوری و مقدار آب مصرفی ثابت در نظر گرفته شد و مدت زمان عمل آوری به عنوان 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

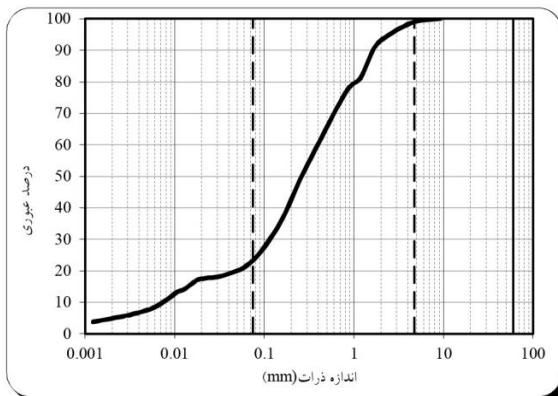
پس از بررسی مطالعات خاک‌شناسی انجام شده، توسط سایر محققین در مناطق مختلف اصفهان و حومه آن و بررسی میدانی خاک این مناطق، ۴ منطقه به شرح زیر برای نمونه‌برداری جهت تهیه مناسب‌ترین خاک انتخاب گردید:

- ۱- منطقه سین در شمال اصفهان
  - ۲- منطقه سگزی در شرق اصفهان
  - ۳- منطقه محمودآباد در شمال غرب اصفهان
  - ۴- 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 ۱-۴)،



ن ۳. دانه‌بندی خاک شماره سه از منطقه محمودآباد.

تعیین حدود اتربرگ، اندازه‌گیری چگالی ویژه خاک، تعیین pH، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و میزان انقباض خطی خاک، مطابق با استانداردهای بین‌المللی انجمان مواد و آزمون آمریکا<sup>۲</sup>، انجمان ادارات حمل و نقل و بزرگراه‌های ایالتی امریکا<sup>۳</sup> و مؤسسه استانداردهای انگلستان<sup>۴</sup> در شرایط آزمایشگاهی و با رعایت استانداردهای لازم به شرح مندرج در جدول شماره ۱ انجام شد. در آزمایش دانه‌بندی به طور همزمان از الک (الکهای شماره مش ۴، ۸، ۱۲، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰) و هیدرومتری استفاده شد و براساس نتایج حاصله طبقه‌بندی و بافت خاک مشخص شد.

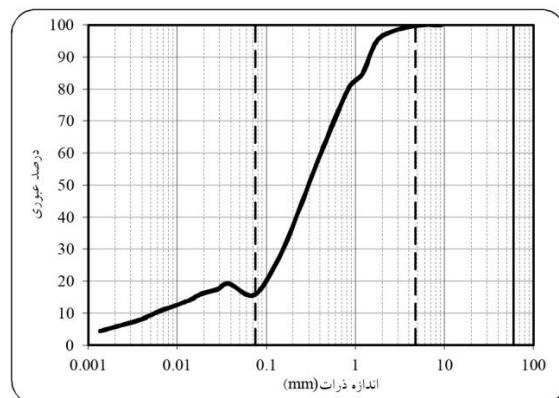


ن ۴. دانه‌بندی خاک شماره چهار از منطقه مهیار.

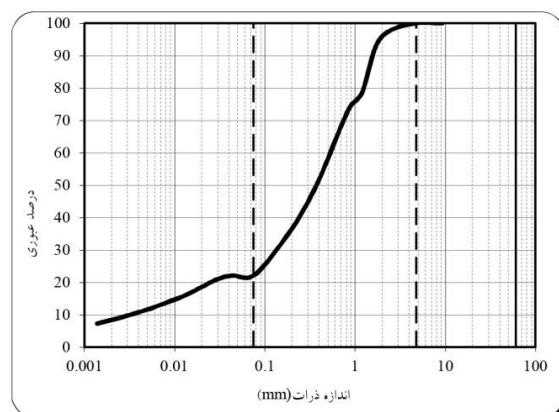
نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی نمونه خاک‌های مناطق مختلف فوق به روش‌های آزمایشگاهی مورد نظر در جدول شماره ۲ مندرج است.

### 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



ن ۱. دانه‌بندی خاک شماره یک از منطقه سین.



ن ۲. دانه‌بندی خاک شماره دو از منطقه سگزی.

در صد مواد آلی را دارا می باشد که این ویژگی نیز این خاک را نسبت به سایر نمونه ها برای تهیه مصالح خاکی متمایز و مناسب تر می گردد. اندازه گیری میزان هدایت الکتریکی نمونه ها نشان داد که کمترین میزان هدایت الکتریکی را خاک منطقه سگزی دارد و خاک های منطقه سین و مهیار با هدایت الکتریکی نزدیک به یکدیگر در رتبه بعدی قرار می گیرند و بیشترین میزان هدایت الکتریکی را خاک منطقه محمودآباد نشان می دهد. هدایت الکتریکی خاک شاخصی از میزان شوری است و میزان شوری بالا نشان دهنده حضور میزان بالای نمک های محلول پس در خاک می باشد 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 پایین تر بودن در صد نمک های محلول آن، برای تهیه مصالح خاکی مناسب تر است. بنابراین با توجه به مجموع نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی نمونه های خاک تهیه شده از مناطق مختلف، به نظر می رسد که خاک به دست آمده از دشت مهیار به دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بهتر نسبت با سایر نمونه ها برای تهیه ملات کاهگل مناسب تر می باشد.

### تهیه کاهگل و مطالعه آزمایشگاهی آن

با توجه به اهمیت در صد 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، نمونه های مختلفی از این ملات با درصد های مختلف کاه گندم تهیه شد (تصویر شماره ۸) و پس از یک ساعت عمل آوری تحت همزدن دستی و ماندگاری برای قوام آمدن ملات، با استفاده از

می شوند ولی تفاوت های آشکاری نیز میان آن ها مشاهده می گردد. تعیین حدود اتربرگ نمونه های خاکی از آن است که با توجه به پایین تر بودن دامنه خمیری خاک منطقه مهیار، نسبت به سایر نمونه ها، این خاک کمتر دچار ترک می شود در حالی که خاک های مناطق سگزی، سین و محمودآباد به ترتیب به دلیل داشتن بالاترین دامنه خمیری، آمادگی و تمایل بیشتری به ترک خوردن دارند. علاوه بر این، این داده ها با نتایج به دست آمده از اندازه گیری در صد انقباض خطی نمونه های خاک به خوبی مطابقت دارد، به طوری که کمترین در صد انقباض خطی، مربوط به خاک مهیار و بیشترین میزان انقباض خطی را خاک منطقه سگزی از آن خود کرده است و خاک های مناطق سین و محمودآباد در رتبه های بعدی می باشند. با توجه به اهمیت میزان انقباض نمونه خاک پس از خشک شدن، روشن است که هرچه در صد انقباض خاک کمتر باشد، به همان نسبت میزان ترکها و ریز ترک های ایجاد شده در سطح ملات تهیه شده از خاک نیز کاهش می یابد که از این نظر نیز خاک مهیار نسبت به سایر نمونه ها برتری دارد. همچنین از یک سو وجود مواد آلی که بیشتر شامل ترکیبات کربنی پیچیده حاصل از بقا یابی گیاهی و حیوانی در ترکیب خاک است، برای تهیه مصالح خاکی مورد استفاده در ساخت و ساز مضر می باشد و موجب تغییر رنگ نامطلوب و کاهش مقاومت و دوام مصالح می گردد و از سوی دیگر حضور بیش از حد این مواد باعث اختلال در روند تثبیت خاک با مواد افزودنی می شود؛ بنابراین اندازه گیری و تعیین در صد مواد آلی در نمونه های خاکی که جهت تهیه مصالح خاکی به کار می رود از اهمیت به سزایی برخوردار است. اندازه گیری در صد مواد آلی نمونه های خاک انتخابی، نشان دهنده آن بود که در میان چهار نمونه خاک مورد آزمایش، خاک مهیار کمترین

سانتیمتر برای اندازه‌گیری درصد انقباض خطی (تصویر شماره ۱۰).

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

۴ - نمونه‌های مکعبی  $5 \times 5 \times 5$  سانتیمتر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری (تصویر شماره ۱۲).

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

۱- نمونه‌های مکعب مستطیل  $10 \times 10 \times 3$  سانتیمتر برای بررسی وضع ظاهری و میزان ترک‌های سطحی ملات

(تصویر شماره ۹).

۲- نمونه‌های نیم استوانه‌ای استاندارد به طول ۱۴



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



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



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



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

در تهیه تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی ملات کاهگل، در این مرحله، شرایط تهیه ملات، نحوه عمل آوری، 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، ۶ 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، کترل شد تا شرایط



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

درصد وزنی، میزان مقاومت کششی نمونه‌های کاهگل به تدریج باشبیب 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 ترک خوردنگی نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد، این یافته با کاهش تعداد ترک‌های سطحی ایجاد شده پس از خشک شدن نمونه‌های کاهگل نیز مطابقت دارد. به علاوه با افزایش درصد الیاف کاه در نمونه‌ها، وضعیت ظاهری آن‌ها نیز تغییر می‌کند، به طوری که با افزایش درصد کاه میزان استحکام و انسجام نمونه‌ها کاهش و سطح آن‌ها به تدریج صافی و یکدستی خود را به دلیل افزایش درصد الیاف ازدست داده و ناصاف و زمخت می‌گردد. با توجه به نتایج فوق به نظر می‌رسد که مناسب‌ترین میزان الیاف کاه برای تهیه ملات کاهگل با خاک انتخابی، تهیه کاهگل با ۵ درصد وزنی الیاف کاه می‌باشد که در آن میزان مقاومت فشاری و مقاومت کششی کاهگل در حد قابل قبولی است، ضمن آن که میزان انقباض و ترک خوردنگی 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.

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 ۲۴ ساعت در آون در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا تقریباً خشک شوند و در مرحله پایانی برای خشک شدن کامل آن‌ها، ۲۴ ساعت دیگر نمونه‌ها در آون با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. پس از خروج نمونه‌ها از قالب و توزین مجلد، تمامی آن‌ها به مدت ۱۴ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری شد و پس از رسیدن سن نمونه‌ها به ۱۴ روز، مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن‌ها اندازه‌گیری شد (تصاویر شماره ۱۳-۱۵).

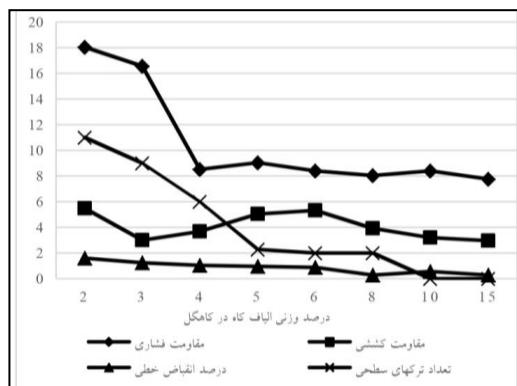
بررسی نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های کاهگل تهیه شده با درصدهای مختلف کاه حاکی از آن است که با افزایش درصد الیاف کاه در ترکیب کاهگل، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز به دلیل کاهش ذرات خاک درگیر با الیاف به تدریج کاهش می‌یابد. هنگامی که درصد الیاف کاه در ملات از ۲ درصد وزنی به ۴ درصد می‌رسد افت شدیدی در مقاومت فشاری ملات کاهگل مشاهده می‌شود، به طوری که در نمودار مقاومت فشاری نسبت به درصد الیاف کاه نیز مقاومت فشاری کاهگل با شبیه بسیار تنیدی سقوط می‌نماید ولی این افت مقاومت فشاری پس از رسیدن درصد الیاف کاه در کاهگل به ۴ 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 نمونه‌ها نشان‌دهنده آن است که با افزایش درصد الیاف کاه تا ۶ درصد، مقاومت کششی نمونه‌ها با شبیب ملایمی به تدریج افزایش می‌یابد ولی بعد از آن با افزایش درصد وزنی الیاف کاه از ۶ به ۱۵



ت ۱۴. اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های کاهگل مکعبی. مأخذ: نگارنده.



ت ۱۵. گسیختگی نمونه کاهگل پاپیونی در دستگاه بربیکت. مأخذ: نگارنده.



ن ۵. نتایج آزمایش نمونه‌های کاهگل با درصدهای مختلف الیاف کاه.

**بررسی مدت زمان عمل آوری ملات کاهگل**

به منظور مطالعه تأثیر مدت زمان عمل آوری ملات کاهگل بر خواص مکانیکی آن، نمونه‌هایی از ملات کاهگل با ۵ درصد وزنی الیاف کاه و مدت زمان‌های مختلف عمل آوری از ۱ ساعت تا ۲۱ شبانه روز تهیه و مقاومت فشاری و مقاومت کششی آنها، پس از خشک شدن در سن ۱۴ روز، ارزیابی شد تا تأثیر مدت زمان عمل آوری به عنوان متغیر مورد مطالعه مشخص گردد که نتایج آن در جدول شماره ۴ و نمودار شماره ۶ مندرج است.

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از این مطالعات حاکی از آن است که طول مدت زمان عمل آوری در ملات کاهگل تأثیر به سزایی بر خواص عمل آوری آن دارد، به طوری که با افزایش مدت زمان عمل آوری تا ۲۴۰ ساعت (۱۰ شبانه روز)، مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات کاهگل به تدریج با شبی ملایمی افزایش می‌یابد ولی پس از گذشت ۲۴۰ ساعت، به دلیل 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 عمل آوری 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 عمل آوری موجب بهبود مقاومت کششی ملات کاهگل شده است ولی این افزایش بسیار تدریجی و اندک است و همان طوری که در نمودار شماره ۶ مشاهده می‌شود، افزایش مقاومت کششی ملات با شبی ملایمی خود را نشان داده است ولی با گذشت ۴۸ ساعت از مدت زمان عمل آوری ملات کاهگل، میزان مقاومت فشاری ملات به طور محسوسی تا ۵۸ درصد افزایش یافته است و بعد از آن،

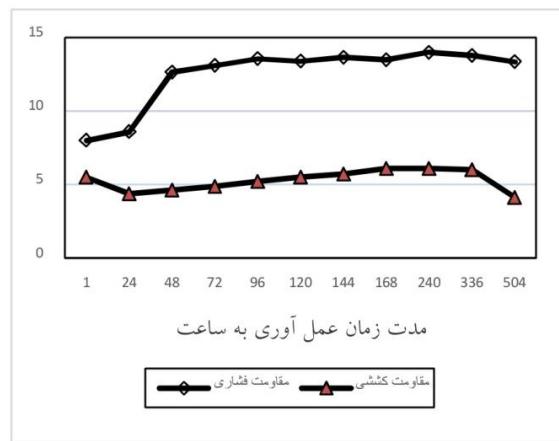
افزایش آن در این مرحله، نسبت به مرحله قبل، تنها این افزایش با شیب ملایمی تا گذشت ۲۴۰ ساعت از زمان عمل آوری، همچنان ادامه می‌یابد ولی میزان افزایشی حدود ۷/۱۰ درصد را نشان می‌دهد.

CW15h1	CW10h1	CW8h1	CW6h1	CW5h1	CW4h1	CW3h1	CW2h1	نمونه کاهگل
خاک منطقه ۴	خاک منطقه ۴	خاک منطقه ۴	خاک منطقه ۴	خاک منطقه ۴	خاک منطقه ۴	خاک منطقه ۴	خاک منطقه ۴	نوع خاک
۱۵	۱۰	۸	۶	۵	۴	۳	۲	درصد وزنی کاه
۷۵/۷	۴/۸	۰/۷/۸	۴/۸	۰/۵/۹	۵۳/۸	۵۶/۱۶	۰/۴/۱۸	مقاومت فشاری Kg/Cm <sup>2</sup>
۹۵/۲	۲/۳	۹۴/۳	۳۱/۵	۰/۴/۵	۶۷/۳	۳	۴۹/۵	مقاومت کششی Kg/Cm <sup>2</sup>
۳/۰	۰/۵۰	۳/۰	۹/۰	۹۵/۰	۱	۲۵/۱	۷/۱	درصد انقباض خطی
فاقد استحکام و انسجام و بسیار سبک	با استحکام و انسجام کم و بسیار سبک	تا حدی مستحکم، منسجم و سنگین	نسبتاً مستحکم، منسجم و سنگین	مستحکم، منسجم و سنگین	مستحکم، منسجم و سنگین	بسیار مستحکم و منسجم و سنگین	بسیار مستحکم و منسجم و سنگین	وضعیت ظاهری
بسیار زمخت و ناصاف	تا حدی یکدست و زمخت	تا حدی یکدست و زمخت	نسبتاً یکدست و کمی زمخت	صفاف و یکدست	صفاف و یکدست	بسیار صاف و یکدست	بسیار صاف و یکدست	وضعیت سطحی
صفر	صفر	۲	۲	۲/۳	۶	۹	۱۱	میانگین تعداد ترک‌های سطحی

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

مقاطومت کششی	مقاطومت فشاری	مدت عمل آوری	درصد کاه	نوع خاک	کد کاهگل
۴۹/۵	۸	۱ ساعت	۵	۴	CW51h
۳۸/۴	۵۹/۸	۲۴ ساعت	۵	۴	CW51d
۶۳/۴	۶۴/۱۲	۴۸ ساعت	۵	۴	CW52d
۸۷/۴	۰/۹/۱۳	۷۲ ساعت	۵	۴	CW53d
۲۱/۵	۵۵/۱۳	۴ شبانه روز	۵	۴	CW54d
۵۱/۵	۳۹/۱۳	۵ شبانه روز	۵	۴	CW55d
۷۱/۵	۶۵/۱۳	۶ شبانه روز	۵	۴	CW56d
۱۱/۶	۴۸/۱۳	۷ شبانه روز	۵	۴	CW57d
۱/۶	۱۴	۱۰ شبانه روز	۵	۴	CW510d
۶	۷۹/۱۳	۱۴ شبانه روز	۵	۴	CW514d
۱۳/۴	۳۴/۱۳	۲۱ شبانه روز	۵	۴	CW521d

### ج ۴. نتایج بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های کاهگل با زمان‌های عمل آوری متفاوت.



ن.۶. مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه های کاهگل تهیه شده با زمان های عمل آوری متفاوت.

عمل آوری در معرض رطوبت قرار گیرد و سپس استفاده شود.

۴- با توجه به افت خواص مکانیکی ملات کاهگل و کاهش مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات پس از گذشت ۲۴۰ ساعت (۱۰ شبانه روز) عمل آوری، به دلیل پوسیدگی شدید الیاف گیاهی کاه موجود در ملات، به نظر می رسد که حداقل مدت زمان عمل آوری و ماندگاری ملات کاهگل ۲۴۰ ساعت است.

۵- مناسب ترین محدوده زمانی قابل ارائه برای عمل آوری ملات کاهگل ۱۶۸-۷۲ ساعت (۳-۷ شبانه روز) می باشد.

#### پیشنهادهایی برای مطالعات آینده

با توجه به قابلیت ها و اهمیت استفاده از مصالح خاکی سنتی همچون خشت و کاهگل در معماری و حفاظت و مرمت این بناهای تاریخی و فرهنگی، تلاش برای بهسازی و توامندسازی مصالح فوق با حفظ اصاله های فرهنگی آن به منظور احیاء و توسعه کاربرد این مصالح در معماری شهری و روستایی از اهمیت بهسازی برخوردار است. در راستای تحقیق انجام شده بر روی کاهگل پیشنهاد می گردد که در مطالعات آتی، با توجه به کارکرد اصلی اندود کاهگل به عنوان 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 عمل آوری، بر دوام این اندود سنتی تحت تأثیر بارندگی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد علاوه بر این ضروری است تا روش های مناسب بهسازی و افزایش دوام کاهگل با استفاده از افروزندهای مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد تا به توان با استفاده از مواد افروزنده مناسب، کارآمد و مقرون به صرفه دوام و طول عمر اندود کاهگل را در مقابل فرسایش ناشی از عوامل

#### نتیجه

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

۱- مناسب ترین نسبت ترکیب در ملات کاهگل، استفاده از ۴-۵ درصد الیاف کاه در ترکیب این ملات است، زیرا علاوه بر داشتن مقاومت فشاری و مقاومت کششی مناسب، میزان انقباض و ترک خوردگی ملات نیز در این نسبت ترکیب، پایین بوده و ملات حاصل، استحکام، انسجام و یکدستی مناسبی دارد.

۲- طول مدت زمان عمل آوری تأثیر بهسازی بر کیفیت ملات کاهگل دارد، به طوری که با افزایش مدت زمان عمل آوری خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل، از جمله مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن، بهبود یافته و ارتقاء می یابد.

۳- با توجه به افزایش ۵۸ درصدی مقاومت فشاری ملات کاهگل پس از ۴۸ ساعت عمل آوری به نظر می رسد که برای دستیابی به کاهگلی با کیفیت مناسب، بایستی حداقل، ملات کاهگل به مدت ۴۸ ساعت جهت

- 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)، روش‌های اجرایی ساختمناسازی از سنتی تا پیشرفته، چاپ اول، تهران: جهان جام جم.
- فرج‌یار، 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، ۱۴۸-۱۵۸، تهران: نشر اداره کل آموزش و انتشارات سازمان میراث فرهنگی کشور.
- ماریانی، لوکا. (۱۳۷۵)، بازپرایی 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 محدوده شهر اردکان با استفاده از سنجش از دور»، فصلنامه تحقیقات مرتض و بیابان ایران، دوره ۱۵، شماره ۱، ۱-۱۲.
- محب‌علی، 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

محیطی، بهویژه رطوبت بارندگی افزایش داد. شناخت مکانیسم‌های شیمیایی که موجب عمل آوری و بهبود خواص کاهگل در طی ماندگاری آن تحت رطوبت می‌شود، بایستی در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار گیرد. بررسی تأثیر مدت زمان عمل آوری بر عملکرد الیاف کاهگل 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 عمل آوری 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
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.
- تقوانی، حسن. (۱۳۸۵)، «پایداری منظر و بوم در مناطق گرم و خشک و کویری ایران»، همایش علمی منطقه‌ای معماری کویر، ۱-۱۴، اردستان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان.
- خدابنده، ناهید، ماجدی اردکانی، 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.
- دوئیه، زان. (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، ۱۹-۳۲.

بیان زایی در منطقه خضر آباد بزد، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۲، شماره ۳، ۶۹-۹۴.

- وارن، جان. (۱۳۸۵)، حفاظت سازه های گلین، ترجمه مهرداد 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](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.
- Gaudreau, 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.
- Maher, Mahmoud R., Maher, 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 earthen archeological sites. CRM Cultural resource management, 22(6), 59-62.
- Morris, J. & Booyens, 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,