

بررسی تأثیر سیلیکات سدیم و آکرلیک بر مقاومت فشاری، خمشی و رطوبتی ملات کاهگل

شایسته نامور*، مسعود زرینی**

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۵/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۸/۰۹/۱۵

چکیده

بهره‌گیری از منابع و مصالح محلی نقش بسزایی در کاهش قیمت مصالح و قطعات و نیز انطباق محصول با شرایط اقلیمی دارد. مصالح خاکی، پرمصرف‌ترین مصالح بکار رفته در اجزای سازه‌ای و پوششی بناهای تاریخی و همچنین روستاهای سراسر ایران محسوب می‌شوند. این در حالی است که پشت بام و دیوارهای پوشیده شده با ملات‌های گلین به دلیل مقاومت کم در برابر بارهای جانبی و ترک‌خوردگی دیوارها، فرسایش سریع در اثر رطوبت، مقاومت کم در برابر سایش و ضربه سالانه نیازمند بازسازی و تعمیر مکرر می‌باشند که این امر، موجب اجتناب مردم از استفاده از این گونه مصالح شده است. لذا دوام مصالح گلین از جمله کاهگل به‌عنوان یکی از مصالح پایدار و سازگار با محیط‌زیست و اقلیم، بسیار حائز اهمیت است. هدف از پژوهش حاضر، یافتن طرح اختلاط بهینه ملات کاهگل براساس بررسی برخی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل ساخته شده با افزودنی‌های مختلف می‌باشد. در این راستا ملات‌های ساخته شده از خاک، کاه به نسبت حجمی ۸۰ و آب با نسبت حجمی ۴۲ درصد با افزودنی‌های سیلیکات سدیم و آکرلیک، به نسبت‌های مختلف ترکیب می‌شوند و تفاوت مقاومت آن‌ها در برابر بارهای خمشی و فشاری و همچنین رطوبت بررسی می‌شود. همه مراحل تهیه، ساخت و آزمایش براساس استانداردها در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه یزد انجام شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت کاهگل حاوی سیلیکات سدیم با نسبت ۱۰۰ درصد حجمی آب به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که شاخص‌های مقاومت در برابر رطوبت، فشار و خمش کاهگل دارای افزودنی سیلیکات سدیم، خیلی بیشتر از کاهگل معمولی است. همچنین دوام اثر افزودنی کاهگل ساخته شده با افزودنی ۱۰۰٪ سیلیکات سدیم در برابر فشار آب، بسیار بیشتر از نمونه‌های پیشین برآورد شد. از طرف دیگر با افزایش میزان آکرلیک در نسبت‌های بالاتر از ۷۰ درصد حجمی خاک، چسبندگی سطحی بیشتری بین ذرات بوجود می‌آید.

کلمات کلیدی: کاهگل، سیلیکات سدیم، آکرلیک، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی.

* کارشناسی ارشد معماری دانشگاه یزد. shayesteh.namvar@gmail.com

** عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه یزد.

لوتوس اثر رضایت بخشی دارد. مشکین فام (۲۰۱۳) پوشش مقاوم کاهگل ضد آب طراحی کرده است که به سطوح مختلف در ضخامت کم چسبندگی خوبی دارد. او با اضافه کردن ترکیب‌های مختلف رزین‌های آب پایه و افزودن مواد معدنی میکرونیزه به همراه کاه و گل مناسب به ترکیب همگن از کاهگل در ضخامت کم رسید. گردن اشنایدر (۱۹۸۰) جهت بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاهگل همچون مقاومت فشاری، خمشی، جذب صدا، رسانایی انرژی و برخی ویژگی‌های کلی ساختاری از افزودنی‌های سلولز، سیلیکات سدیم و پتاسیم و یا هیدروکسید سدیم به نسبت‌های مختلف در ترکیب با خاک و آب استفاده نمود که در نتیجه به محلول هیدروکسید آبی متشکل از هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم و مخلوطی از آن‌ها دست یافت. واتاناجی و همکاران (۲۰۱۵) از سیلیکات سدیم و پوشش دافع آب جهت بهبود ویژگی‌های مکانیکی و افزایش مقاومت کاهگل در برابر آب در محیط‌های مرطوب استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش محتوای سیلیکات سدیم به‌عنوان افزودنی دافع آب می‌توان جذب مویرگی باران را کاهش داد و مقاومت اندود را تثبیت نمود. آن‌ها همچنین پیش‌بینی کردند که اندود ساخته شده با ۳ درصد سیلیکات سدیم می‌تواند بیشترین مقاومت را در برابر آب داشته باشد.

جهت افزایش مقاومت کاهگل در برابر ترک خوردگی نیز از انواع مواد افزودنی تثبیت‌کننده و تقویت‌کننده همچون موی حیوانات، سیوس، لویی، کاه، ماسه، سیمان، آهک و غیره استفاده می‌شود. زینی و همکاران (۲۰۱۲) موفق شدند با اضافه کردن تکه‌های ضایعاتی نخ آکرلیک قدرت کششی و خمشی کاهگل را نسبت به کاهگل خالص تا مقدار قابل توجهی افزایش دهند. ترانلی و همکاران (۲۰۱۱) یک تحقیق تجربی در مورد

پشت بام و دیوارهای پوشیده شده با ملات کاهگل بدلیل فرسودگی و عدم مقاومت در برابر رطوبت و بارهای وارده، سالانه نیازمند بازسازی و تعمیر مکرر می‌باشند که این امر، موجب اجتناب مردم از استفاده از این گونه مصالح شده است. لذا دوام ملات کاهگل به‌عنوان یکی از مصالح پایدار و سازگار با محیط‌زیست بسیار حائز اهمیت است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی نقش افزودنی‌های مختلف بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاهگل می‌باشد که از جمله آن‌ها، مقاومت در برابر رطوبت، فشار و خمش است. در این راستا آکرلیک و سیلیکات سدیم به‌عنوان مواد افزودنی در ملات کاهگل مورد استفاده و بررسی قرار می‌گیرند و پژوهش حاضر در صدد است تا با روش تجربی و با استفاده از ابزار آزمایشگاهی و مطالعات اسنادی پاسخی برای پرسش‌های زیر بیابد:

۱. مواد افزودنی سیلیکات سدیم و آکرلیک چه تأثیری بر مقاومت فشاری و خمشی ملات کاهگل دارند؟
۲. سیلیکات سدیم و آکرلیک چه تأثیری بر مقاومت در برابر رطوبت ملات کاهگل دارد؟
۳. طرح اختلاط بهینه ملات کاهگل شامل چه روش و ترکیباتی می‌باشد؟

پیشینه تحقیق

در جهت مقاوم‌سازی کاهگل در برابر رطوبت، افزودنی‌های مختلفی در ترکیب با مخلوط کاهگل بررسی شده‌اند. عطایی یزد و همکاران (۲۰۱۰) از صمغ طبیعی و نانوذرات سیلیس (SiO_2) جهت افزایش مقاومت رطوبتی ملات کاهگل استفاده نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند ایجاد یک لایه از نانوذرات بر روی اندود کاهگل برای آبگریزی و در نتیجه آن ایجاد پدیده

نوع خاک، چسبندگی بالای رس، دارا بودن سطح ویژه بسیار زیاد و بار منفی، رطوبت‌پذیری بالا و تناسب رفتارهای مهندسی خاک رس با خصوصیت خمیری و رطوبت است. آنالیز مواد این نوع خاک در جدول شماره ۱ آورده شده است.

ترکیبات	میزان %
SiO ₂ (دی‌اکسید سیلیسیم)	۴۹/۵۱
Al ₂ O ₃ (اکسید آلومینوم)	۱۳/۸
L.O.I	۱۳
CaO (اکسید کلسیم)	۹/۱۹
MgO (اکسید منیزیم)	۴/۱۳
Fe ₂ O ₃ (اکسید آهن - هماتیت)	۵/۱۳
K ₂ O (اکسید پتاسیم)	۲/۹۴
Na ₂ O (اکسید سدیم)	۱/۱۸
MnO (اکسید منگنز)	۰/۰۹۶
SO ₃ (تری اکسید گوگرد)	۱/۰۲۴
Cu (مس)	
P ₂ O ₅ (اکسید فسفر (V))	
TiO ₂ (دی اکسید تیتانیم)	
جمع کل	۱۰۰

ج ۱. آنالیز خاک مورد استفاده، منبع: نگارندگان.
(اکسید کلسیم بدون تغییرات در خاک، آنالیز شده است.)

گاه نیز جهت مقاوم‌سازی در برابر ترک‌خوردگی انتخاب شده که در ترکیب با گل باعث کاهش ترک‌خوردگی و افزایش مقاومت خاک می‌شود.

از میان مواد افزودنی مختلف نیز از لاتکس پلیمری آکرلیک پایه آب به‌عنوان امولسیون ۳۵٪ با آب ترکیب شدند. جدول شماره ۲ و سیلیکات سدیم (Na₂SiO₃) به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده از شرکت «پتروکویر صدر» یزد تهیه شد (جدول شماره ۳) که از سه جزء سازنده، سیلیس (جزء سازنده اصلی)، قلیا (سدیم اکسید) و آب (تعیین‌کننده خواص ترکیب‌های آب‌دار و بی‌آب) تشکیل شده است. دلیل انتخاب این ماده فراوانی، در دسترس بودن، قیمت نسبتاً مناسب، عدم وابستگی خارجی، رنگ و کیفیت قابل قبول آن، مقاومت در مقابل نفوذ آب و همچنین سازگاری بیشتر خاک، نسبت

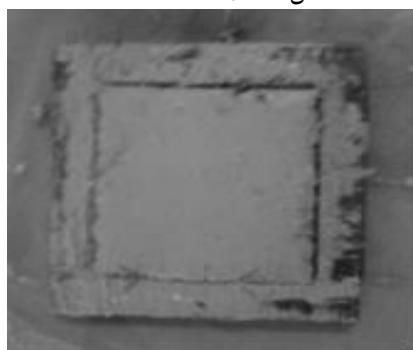
استفاده از مواد افزودنی و مش در پانل‌های دیواری خشتی انجام داده‌اند. آن‌ها از ۱٪ کاه و ۱۰٪ خاکستر جهت ساخت بلوک‌های خشتی دیوار استفاده کردند، نتایج نشان داد که پانل‌های دیواری خشتی تقویت شده با مش باعث افزایش مقاومت‌سازه‌ای خشت می‌شود. پراساد و همکاران (۲۰۱۲) بلوک‌های خشتی را با استفاده از فیبرهای پلاستیکی بازیافتی تقویت نمودند و در این راستا از سیمان و آهک نیز جهت پایدارسازی بلوک‌های خشتی استفاده نمودند. آن‌ها ثابت کردند که مقاومت مکانیکی خشت‌های ساخته شده با ۰/۱ درصد فیبر پلاستیکی به میزان ۳ تا ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. برای بهبود مقاومت بلوک خشتی و آرایه مسکن ارزان قیمت، پراکاش (۲۰۱۶) مواد محلی مانند خاک، الیاف سخت و زبر، نی و غیره را به‌همراه سیمان به‌عنوان تثبیت‌کننده مورد بررسی قرار داد. تحقیقات آن‌ها نشان داد که خشت‌های حاوی ۱۰ سیمان و ۳٪ الیاف سخت، ۱۰٪ سیمان و ۳۰٪ الیاف پلاستیکی، مقاومت بالایی در برابر جذب آب داشتند. تحقیق حاضر نیز در ادامه تحقیقات قبلی، به طراحی درصدهای اختلاط مختلف مواد، اقدام نموده است تا بتواند به نسبت‌های بهینه مواد در ساخت ملات کاهگل با استفاده از افزودنی‌های سیلیکات سدیم و آکرلیک برسد و نقش این افزودنی‌ها را بر روی برخی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل بررسی کند.

مواد و روش‌ها

ساخت ملات کاهگل بهینه به سه بخش مرغوبیت مواد اولیه، روش عمل‌آوری مناسب و انتخاب بهترین تکنیک اجرا تقسیم می‌شود. مواد مورد نیاز اولیه جهت ساخت کاهگل شامل: کاه، خاک، آب و افزودنی می‌باشد که خاک مورد استفاده در این پژوهش از نوع رسی بوده و از منطقه خلد برین یزد انتخاب شد. علت انتخاب این

به سایر مواد است.

روش ساخت نمونه‌ها به این صورت است که ابتدا خاک و گاه به نسبت ۸۰ درصد حجمی خاک، سرند شده با الک نمره ۴ درون ظرفی ریخته و با ۲ پیمانه آب مخلوط می‌شوند سپس مخلوط را خوب ورز داده تا یکدست شود. خمیر حاصله در چند نوبت ورز داده می‌شود تا به حالت یکدست و چسبنده تبدیل شود. به صورت چشمی تشخیص داده می‌شود که شبیه ملات بناهای قدیمی است یعنی به صورت خمیری شل مانند است. البته بعضی مواقع امکان دارد که این درصد تا حدودی تغییرات داشته باشد که بستگی به نوع خاک مصرفی دارد. علت انتخاب این روش این است که سایر روش‌ها، قابلیت اجرای دقیق با دست را ندارد ولی اگر زمان در اجرا اهمیت پیدا کند، با استفاده از "میکسر" (دستگاه مخلوط‌کننده بتن که باید همانند استانداردهای تهیه مخلوط بتن باشد) می‌توان ملات کاهگل را تهیه نمود. ابعاد مورد استفاده برای قالب‌ها توسط مؤسسه کراتره فرانسه جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی پیشنهاد شده است. (ابعاد قالب = ۱۰*۱۰*۱ cm) (شکل شماره ۲) قالب‌های مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های خمشی نیز با ابعاد (۱۶*۴*۴ cm) انتخاب شدند (شکل شماره ۱).



ت ۱. قالب ۱۰*۱۰*۱ cm استفاده شده جهت آزمون آبشانی.

مصالح	ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی		
	ظاهر در	وزن مخصوص (g/m ³)	حلالیت در آب (mg.L ⁻¹)
لاتکس آکرلیک	مایع سفید شیری	1.022	< 1

ج ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آکرلیک،

منبع: نگارندگان.

مصالح	ویژگی‌ها	
سیلیکات سدیم	فرمول	Na ₂ O(SiO ₂) _x .xH ₂ O
	جرم مولی (gmol ⁻¹)	122.06
	دانسیته 20 °C (g/mL)	1.39
	ویسکوزیته @ 20 °C (cps)	60
	pH	۱۲.۵

ج ۳. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول سیلیکات

سدیم استفاده شده در تحقیق. منبع: نگارندگان (اطلاعات

مستخرج شده از کارخانه سازنده: شرکت

پتروکویرصدر).

مراحل تهیه نمونه‌ها

در اولین گام، درصد‌های بهینه‌ای از نسبت آب به خاک بررسی شدند. در این راستا نمونه‌های مختلف از ترکیب کاهگل با نسبت‌های ۱۰ تا ۴۵ درصد وزنی آب به خاک تهیه شدند و ویژگی‌های ظاهری آن‌ها از جمله رنگ و ترک‌خوردگی و حالت مخلوط، مورد ارزیابی واقع شدند. دومین مرحله تدوین درصد‌های مناسب گاه و خاک نسبت به یکدیگر بود که بعد از مصاحبه با استادکاران سنتی و مرور تحقیقات پیشین در دانشگاه یزد تدوین شدند. جهت یافتن درصد مناسب اختلاط گاه و خاک (معیار محاسبه: طول ترک) مخلوط‌های متعددی از کاهگل ساخته شد. در نهایت بهینه‌ترین طرح اختلاط کاهگل معمولی جهت بررسی نقش افزودنی‌های تثبیت‌کننده، انتخاب شد.

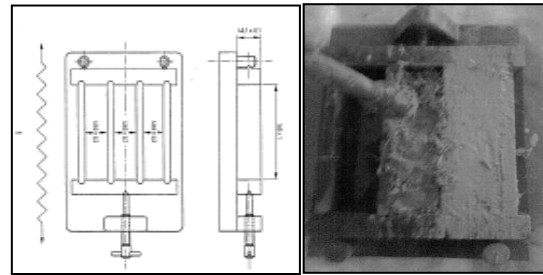
آزمایش‌های مقاومت فشاری انجام شده مبتنی بر ASTM C109 برای هر طرح اختلاط در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه یزد انجام شد. در این روش مخلوط کاهگل آماده شده درون قالب‌های مکعبی ۵×۵×۵ در دو لایه ریخته و هر لایه با ۲۵ ضربه میله‌ای با سطح مقطع ۲۵ میلی‌متر مربع متراکم شدند. پس از طی مدت زمان ۱۰ دقیقه، نمونه‌ها از قالب خارج و در دمای محیط تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند. نمونه‌ها بعد از ۱۵ روز و در شرایط مرطوب به واسطه یک جک هیدرولیکی ۲۰۰ تن تا زمان شکست بارگذاری و میزان کرنش بوجود آمده در آن اندازه‌گیری شدند.

آزمایش‌های مقاومت خمشی انجام شده مبتنی بر ASTM C78 برای هر طرح اختلاط در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه یزد انجام شد. در این روش مخلوط کاهگل آماده شده درون قالب‌های ۴×۴×۱۶ در دو لایه ریخته به ارتفاع ۲۵ میلی‌متر که هر لایه ۳۲ مرتبه توسط میله گوه مانند در قالب مستطیلی متراکم شدند و با کاردک به دقت سطح آن صاف شد. پس از طی مدت زمان ۱۰ دقیقه، نمونه‌ها از قالب خارج و در دمای محیط تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند. نمونه‌ها بعد از ۱۵ روز و در شرایط محیطی هر یک از نمونه‌ها زیر دستگاه قرار گرفته و مقاومت خمشی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

آزمون آیفشانی نیز از نمونه‌هایی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ انجام شد و نمونه‌ها تحت فشار ۱۰۰ ml آب به صورت متمرکز قرار داده شدند. زمان اتمام آزمون، زمان ایجاد حفره کامل در نمونه و عبور آب از آن، در نظر گرفته شد.

نتیجه

در بررسی طرح اختلاط کاهگل، نسبت‌های بهینه ۴۲٪ آب به خاک و ۸۰٪ درصد کاه به خاک بدست آمد که ملات حاصله از آن به نظر بسیار شبیه ملات‌هایی بود که



ت ۲. قالب ۴۰*۴۰*۱۶۰ (ابعاد برحسب میلی‌متر) استفاده شده جهت انجام آزمون خمشی، منبع: نگارندگان.

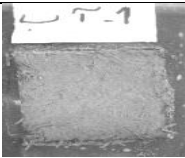


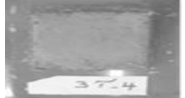
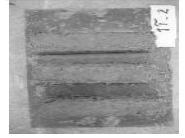
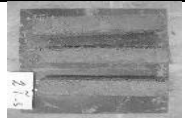
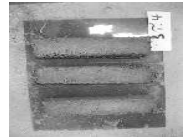
مواد باید به گونه‌ای درون قالب‌ها ریخته شود که کمترین خلل و فرجی میان مواد ایجاد نشود. برای انجام این کار مواد را به تدریج درون قالب‌ها ریخته و هر بار با یک میله گوه مانند مخلوط کوبیده شد تا کمترین حفره‌ای بین مواد ایجاد نشود. همچنین قالب‌ها قبل از ریختن مواد، در آب خیسانده شدند تا مواد به قالب نچسبد و راحت‌تر جدا شود. در نهایت ۷ نمونه به صورت اختلاط جداگانه^۱ و ترکیبی با گل در چند گروه مختلف به شرح جدول شماره ۴ آماده شدند. سپس آزمایش‌های خمشی، فشاری و آیفشانی روی همه نمونه‌ها صورت گرفت. همه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است.

ردیف	کد نمونه	ترکیبات
۱	A	خاک، کاه ۸۰٪ حجمی خاک و آب ۴۲٪ حجمی خاک
۲	B	خاک، کاه ۸۰٪ حجمی خاک، آب ۴۲٪ حجمی خاک و آکرلیک ۱۰۰ درصد حجمی آب
۳	C	خاک، کاه ۸۰٪ حجمی خاک، آب ۴۲٪ و حجمی خاک و آکرلیک ۵۰ درصد حجمی آب
۴	D	خاک، کاه ۸۰٪ حجمی خاک، آب ۴۲٪ حجمی خاک و آکرلیک ۳۰ درصد حجمی آب
۵	E	خاک، کاه ۸۰٪ حجمی خاک، آب ۴۲٪ حجمی خاک و سیلیکات سدیم ۱۰۰ درصد حجمی آب
۶	F	خاک، کاه ۸۰٪ حجمی خاک، آب ۴۲٪ حجمی خاک و سیلیکات سدیم ۵۰٪ درصد حجمی آب
۷	G	خاک، کاه ۸۰٪ حجمی خاک، آب ۴۲٪ حجمی خاک و سیلیکات سدیم ۳۰ درصد حجمی آب

ج ۴. طرح اختلاط کاهگل، منبع: نگارندگان.

در گذشته استفاده می‌شد. غلظت کاهگل با نسبت ۰.۴۲٪ آب به‌گونه‌ای بود که همچون خمیر شده و یکدستی بیشتری داشت. همچنین از نظر اجرایی، کار کردن با آن بسیار راحت‌تر و مناسب‌تر بود. درصدهای کمتر از ۱۰ کارایی نداشته و بیشتر از ۵۰ شکل نمی‌گرفتند. در رابطه با درصد مناسب اختلاط کاه و خاک نیز نسبت وزنی ۱

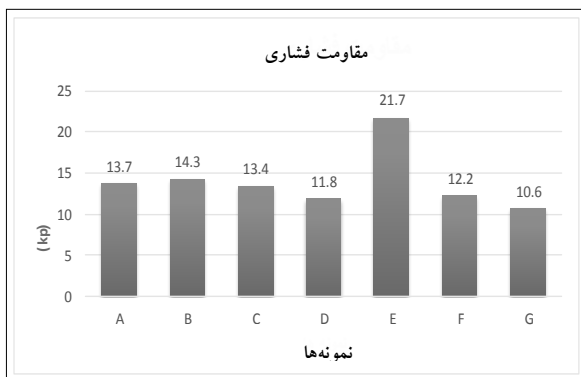
به ۳۰ کاه نسبت به خاک انتخاب شد. در جهت بررسی نقش افزودنی‌ها بر روند انقباض ملات کاهگل به‌هنگام خشک‌شدن مشاهده شد که ترکیب دو افزودنی آکرلیک و سیلیکات سدیم در ملات گل باعث کاهش بیشتر انقباض و ترک‌خوردگی نسبت به ترکیب کاهگل معمولی می‌شود (جدول شماره ۵).

مشخصات	چگالی g/cm ³	تصویر	ترکیبات	کد
عدم ترک‌خوردگی و رنگ روشن	۱.۸۷		خاک + کاه + آب	A
عدم ترک‌خوردگی و رنگ تقریباً تیره‌تر از کاهگل معمولی	۱.۹۱		خاک + کاه + آب + آکرلیک ۱۰ درصد حجمی آب	B
عدم ترک‌خوردگی و رنگ روشن	۲.۰۳		خاک + کاه + آب + آکرلیک ۵۰ درصد حجمی آب	C
عدم ترک‌خوردگی و رنگ روشن	۱.۸۳		خاک + کاه + آب + آکرلیک ۳۳ درصد حجمی آب	D
عدم ترک‌خوردگی و رنگ تیره‌تر	۲.۰۹		خاک + کاه + آب + سیلیکات سدیم ۱۰ درصد حجمی آب	E
عدم ترک‌خوردگی و رنگ تیره	۲.۰۸		خاک + کاه + آب + سیلیکات سدیم ۵۰ درصد حجمی آب	F
عدم ترک‌خوردگی و رنگ تیره	۱.۸۰		خاک + کاه + آب + سیلیکات سدیم ۳۰ درصد حجمی آب	G

ج ۵. نقش افزودنی‌ها بر روند انقباض ملات کاهگل هنگام خشک‌شدن. منبع: نگارندگان

فضاهای بین دانه‌های خاک می‌شود.

براساس نتایج تحقیق با افزایش میزان سیلیکات سدیم و آکرلیک در نسبت‌های بالاتر از ۷۰ درصد، چسبندگی سطحی بیشتری بین ذرات بوجود می‌آید (نمودار شماره ۱).



ن ۱. نمودار مقاومت فشاری آزمون‌ها، منبع: نگارندگان.

بار وارده (KP)	ترکیبات	نمونه
۱۳.۷	کاهگل معمولی	A
۱۴.۳	کاهگل+آکرلیک (۱۰٪ حجمی آب)	B
۱۳.۴	کاهگل+آکرلیک (۵۰٪ حجمی آب)	C
۱۱.۸	کاهگل+آکرلیک (۳۰٪ حجمی آب)	D
۲۱.۷	کاهگل+سیلیکات کلسیم (۱۰٪ حجمی آب)	E
۱۲.۲	کاهگل+سیلیکات کلسیم (۵۰٪ حجمی آب)	F
۱۰.۶	کاهگل+سیلیکات کلسیم (۳۰٪ حجمی آب)	G

ج ۶. رفتار نمونه‌های کاهگلی در آزمون فشاری،

منبع: نگارندگان.

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت خمشی ۱۵ روزه نمونه‌های ساخته شده با کاهگل، و نسبت‌های مختلف از سیلیکات سدیم و آکرلیک در جدول شماره ۷ نشان داده شده است. در این آزمایش نیز نمونه‌هایی با ابعاد $16 \times 4 \times 4$ cm زیر دستگاه قرار گرفتند. زمان اتمام آزمون، زمان شکسته شدن و دو نیمه شدن نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

همچنین ترکیب افزودنی سیلیکات سدیم در کاهگل معمولی، موجب افزایش چگالی ملات تا 2.03 g/cm^3 می‌گردد. چگالی نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش‌ها از طریق رابطه $\rho = m/V$ محاسبه گردید. با افزوده شدن نسبت آکرلیک و سیلیکات در ترکیب نمونه‌ها، غلظت و حجم مخلوط کاهگل افزایش یافت. همچنین با افزایش نسبت سیلیکات سدیم در ترکیبات، رنگ کاهگل تیره‌تر از کاهگل معمولی شد.

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری ۱۵ روزه نمونه‌های ساخته شده با کاهگل، و نسبت‌های مختلف از افزودنی‌های سیلیکات سدیم و آکرلیک در جدول شماره ۶ نشان داده شده است. زمان اتمام آزمون و ثبت عدد بار وارده، زمان تخریب نمونه‌ها در آزمایش می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نسبت حجمی سیلیکات سدیم از ۰ تا ۵۰ درصد در تمامی ترکیب‌ها، کاهش مقاومت فشاری کاهگل را به همراه دارد حال آنکه افزایش نسبت وزنی سیلیکات سدیم از ۵۰ تا ۱۰۰ درصد، افزایش مقاومت فشاری کاهگل را سبب می‌شود. همچنین با افزایش نسبت حجمی آکرلیک به آب، مقاومت فشاری کاهگل افزایش می‌یابد و کاهگل ساخته شده با افزودنی ۱۰٪ درصد آکرلیک مقاومت فشاری بیشتر نسبت به کاهگل معمولی دارند (نمودار شماره ۱).

با مقایسه نتایج تحقیق می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش نسبت حجمی آکرلیک ۳۰ و ۵۰ درصد نیز موجب کاهش مقاومت فشاری کاهگل می‌شود. به دلیل بزرگتر بودن ابعاد ذرات خاک و کمتر بودن سطح ویژه این ذرات در مقایسه با ذرات سیلیکات سدیم و آکرلیک که سبب افزایش جذب آب به وسیله ذرات افزودنی می‌شود میزان نفوذ افزودنی‌ها در میان دانه‌های خاک موجب افزایش جذب آب و در نتیجه خالی شدن

براساس آزمایش آفشانی، مقاومت نمونه‌ها با افزایش نسبت حجمی سیلیکات سدیم و آکرلیک افزایش می‌یافت (جدول شماره ۸). کاهگل حاوی مواد افزودنی سیلیکات سدیم با نسبت ۱۰۰ درصد حجمی آب و ضخامت ۱ سانتی‌متر، نسبت به بقیه نمونه‌ها، مقاومت بیشتری در برابر فشار آب داشت. بعد از آن نمونه‌های ساخته شده با آکرلیک ۵۰ درصد زمان بیشتری در برابر فشار آب ۱۰۰ ML مقاومت نشان داد و بعد از تقریباً یک ساعت سوراخ شد. تغییرات سطحی ترکیب کاهگل با افزودنی سیلیکات سدیم ۱۰۰ درصد تحت فشار ۱۰۰ ml آب، در زمان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. بعد از ۱ ساعت، یک گودی 2 mm سطحی روی نمونه به وجود آمد و بعد از ۳ ساعت دیگر تغییرات سطحی کندتر شد و گودی تقریباً 3.5 mm شد. ولی از آن به بعد عمق حفره سطحی این نمونه، تا ۴ روز دیگر تغییری نکرده و کاملاً ضد آب بود.

نمونه	ترکیبات	زمان دقیقه	نحوه تخریب
A	کاهگل معمولی	۳	کاملاً متلاشی شد
B	کاهگل + آکرلیک (۱۰۰ درصد)	۵۴	سوراخ شد
C	کاهگل + آکرلیک (۵۰ درصد)	۱۸	سوراخ شد
D	کاهگل + آکرلیک (۳۰ درصد)	۱۰	سوراخ شد
E	کاهگل + سیلیکات سدیم (۱۰۰ درصد)	۱۴۴	یک گودی سطحی ۳ میلی‌متری ایجاد شد
F	کاهگل + سیلیکات سدیم (۵۰ درصد)	۸۰	سوراخ شد
G	کاهگل + سیلیکات سدیم (۳۰ درصد)	۱۸	سوراخ شد

ج ۸. مقاومت نمونه‌ها در آزمون آفشانی،

منبع: نگارندگان

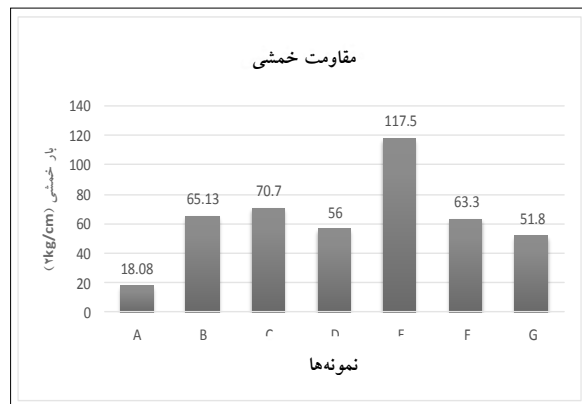
این در حالی است که کاهگل معمولی بعد از ۳ دقیقه در برابر فشار آب، متلاشی شد. در تحقیقات مشابه پیشین نیز ترکیب کاهگل و افزودنی نانوسیلیس ۷۲ ساعت در

نمونه	ترکیبات	بار وارده KG/CM^2
A	کاهگل معمولی	۱۸.۰۸
B	کاهگل + آکرلیک (۱۰۰٪ حجمی آب)	۶۵.۱۳
C	کاهگل + آکرلیک (۵۰٪)	۷۰.۷
D	کاهگل + آکرلیک (۳۰٪)	۵۶
E	کاهگل + سیلیکات کلسیم (۱۰۰٪ حجمی آب)	۱۱۷.۵
F	کاهگل + سیلیکات کلسیم (۵۰٪)	۶۳.۳
G	کاهگل + سیلیکات کلسیم (۳۰٪)	۵۱.۸

ج ۷. رفتار نمونه‌های کاهگلی در آزمون خمشی،

منبع: نگارندگان.

براساس نتایج بدست آمده در آزمایش مقاومت خمشی، (شکل شماره ۴) کاهگل با افزودنی سیلیکات سدیم ۱۰۰٪ بیشترین مقاومت خمشی معادل 117.5 kg/cm^2 را دارا بود همچنین مقاومت خمشی کاهگل با افزودن آکرلیک و سیلیکات سدیم با نسبت‌های ۰ تا ۱۰۰ به شکل چشمگیری افزایش یافت. هر چه درصد افزودنی سیلیکات افزایش یابد، مقاومت خمشی هم افزایش می‌یابد در حالی که مقاومت کاهگل ساخته شده با آکرلیک ۱۰۰٪ کمتر از نمونه‌هایی بود که با آکرلیک ۵۰٪ ساخته شده بودند (نمودار شماره ۲).



ن ۲. نمودار آزمون مقاومت خمشی، منبع نمودار: نگارندگان.

باعث کاهش بیشتر انقباض و ترک خوردگی نسبت به ترکیب جداگانه کاهگل است. همچنین ترکیب افزودنی سیلیکات سدیم در کاهگل معمولی، موجب افزایش چگالی ملات تا 2.03 g/cm^3 می‌گردد. در بررسی مقاومت کاهگل در برابر فشار و خمش و همچنین رفتارهای مختلف فرسایش دهنده رطوبتی، ترکیب بهینه ملات کاهگل با استفاده از افزودنی سیلیکات سدیم می‌باشد که در برابر انواع بارگذاری و رطوبت مقاوم می‌باشد. عناصر تشکیل دهنده آن شامل خاک، کاه، آب و سیلیکات سدیم می‌باشد. تکنیک ساخت مقاوم‌ترین ترکیب ملات کاهگل، شامل درصدهای اختلاط مواد: خاک + کاه (۸۰ درصد حجمی کاه به خاک) + آب (۴۲ درصد حجمی آب به خاک) + سیلیکات سدیم (۱۰۰ درصد حجمی سیلیکات سدیم به آب) می‌باشد. کاهگل حاوی خاک ۸۰٪، آب ۴۲٪ و آکرلیک ۱۰٪ نیز می‌تواند به‌عنوان دومین ترکیب بهینه ملات کاهگل پیشنهاد شود.

پی‌نوشت

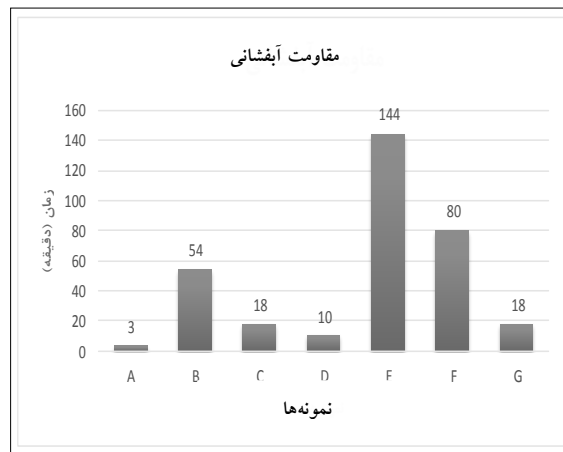
۱. نسبت‌های حجمی اعلام شده در جدول شماره ۴ بدین صورت است که مقدار خاک مورد استفاده در ملات کاهگل ثابت بوده و سایر مصالح نسبت به حجم خاک استفاده شده در مخلوط بکار می‌روند. در این تحقیق به ازای هر پیمانۀ خاک باید ۸ پیمانۀ کاه و ۴۲ پیمانۀ آب، اضافه گردد و از آنجا که مواد افزودنی در آب حل می‌گردد و سپس به مخلوط اضافه می‌شود، نسبت‌های اعلام شده برای افزودنی‌ها نسبت به حجم آب مصرفی تعریف شده است.

فهرست منابع

- مشکین فام، حبیب. (۲۰۱۳)، پوشش مقاوم کاهگلی ضد آب با چسبندگی خوب به سطوح مختلف در ضخامت کم، ایران. شماره اظهارنامه: 13915014000308732.

- عطایی یزد، محمدرضا، کدیور، مرضیه. (۲۰۱۳)، بررسی اثر نانوسیلیکا و صمغ طبیعی بر کاهگل. همایش ملی یافته‌های نوین در مهندسی عمران، نجف آباد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

برابر جدول فشار آب مقاومت نمودند (عطایی یزد و کدیور، ۲۰۱۰). در این تحقیق، کاهگل با افزودنی سیلیکات سدیم ۵۰ درصد ۴۸ ساعت در برابر فشار آب مقاومت نمود. همچنین نمونه‌های ساخته شده با آکرلیک حداکثر در زمان کمتر از ۲ ساعت سوراخ شدند (نمودار شماره ۳).



ن ۳. نمودار مقاومت آبشانی آزمونه‌ها، منبع: نگارندگان.

روش ساخت ملات به صورت دستی و در یک مرحله زمانی یک روزه صورت می‌گیرد. سیلیکات سدیم و آکرلیک به دو روش استفاده می‌شود: ۱. با قلم مو یا اسپری روی کاهگل‌های قدیمی لایه‌ای محافظ از مخلوط سیلیکات سدیم و آب به نسبت حجمی یک به یک، ایجاد شود. ۲. مخلوط با آب برای ساخت کاهگل‌های جدید به کار رود که روش اول فقط مقاومت در برابر سایش و آبشستگی را بالا می‌برد و روش دوم هم مقاومت در برابر بارگذاری را زیاد می‌کند و هم مقاومت در برابر سایش و آبشستگی را بالا می‌برد.

یافته‌ها

با بررسی نقش افزودنی‌ها بر روند انقباض ملات کاهگل به‌هنگام خشک شدن، مشاهده شد که ترکیب دو افزودنی آکرلیک و سیلیکات سدیم در ملات کاهگل

- زینی، مریم؛ حسینی، اشرف السادات؛ هادیزاده، محسن.
(۲۰۱۲)، کاهگل با مقاومت کششی بالا با اضافه نمودن تکه‌های
ضایعاتی نخ اکریلیک، ایران. شماره اظهارنامه:

1391501400030873

- Prasad, C K. S, E K Nambiar, E K. N, Abraham,
M. B. (2012). Plastic Fibre Reinforced Soil Blocks
as a Sustainable Building Material. International
Journal of Advancements in Research &
Technology. Issue 01, Volume 3

- Turanli, L. Saritas, A. (2011). Strengthening the
structural behavior of adobe walls through the use
of plaster reinforcement mesh. Construction and
Building Materials.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.092

-Schneider, G. L. (1980). Earthen cement
compositions for building materials and process. us
Patent No. US4229222 A.

- Prakash, V. Raj, A. Aravind S, Basil M, Sumith V
R (2016). STUDIES ON STABILIZED MUD
BLOCK AS A CONSTRUCTION MATERIAL.
International Journal of Innovative Research in
Advanced Engineering (IJIRAE). Issue 01, Volume
3.

- Banjongkliang, E. Wattanachai, P. Parichatprecha,
R. (2015). Application of Sodium Silicate and
Water Repellent Coating for Improving the
Mechanical Properties and Water Resistance of
Adobe Plaster in Wet Area. 53.Kasetsart University
Annual Confrence. Bangkok(Thailand). 579-576