

Investigating the effect of mixing design variables and moss species on the biological acceptance of concrete facades in the Mediterranean climate

Zahra Koohpayeh¹, Kianoosh Samimi^{2*}, Amirreza Ardekani³

1- Masters student, Faculty of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Bio-receptive concrete facade, a self-sustainable green facade system, has attracted the interest of engineers in Mediterranean regions. Nevertheless, the utilization of this system is hindered by the time-consuming process of concrete livability. This research aimed to expedite and improve the quality of concrete livability using conventional materials. 8 samples were prepared following a standard mix design comprising white cement, water, coarse sand (4-8 mm), and fine sand (0-4 mm), with a water-to-cement ratio of 0.6 along with three species of Sheet moss, Liverwort moss, and Barbula moss were tested over 16 weeks. Results revealed that incorporating 13.5 grams (5% of water content) of vinegar into panel No. 3 and substituting 40% of fine and coarse aggregates with fine pumice aggregates and coarse leca aggregates in panel No. 6, notably decreased the substrate's pH level below 14 and enhanced the water absorption capacity and porosity of the concrete reducing the livability of the panels to 25 days compared to the control sample. Replacing pumice grains with a portion of fine grains in the mixture of panel No. 5 and light grains of leca with a portion of fine grains and coarse grains in the mixture of panel No. 8, facilitated moss growth on the panel surfaces by the end of the fifth week of the experiment. Moss growth was observed on panel No. 2 in the middle of the sixteenth week, which contained 4.5 grams (1% of cement weight) of aluminium powder. no moss growth was detected on the control sample (panel no. 1), the urea-containing sample (panel no. 4), or the sample containing leca as coarse grains and sand as fine grains (panel no. 7) by the end of the 16 weeks. The results indicate that Sheet moss exhibited the highest growth rate and most consistent development among all species.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 May 2024

Revise Date: 28 July 2024

Accept Date: 06 September 2024

Keywords:

Bio-receptivity,
Bio-receptive façade,
green concrete,
Moss biology,
Self-sustainable green- façade.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.458505.3420](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.458505.3420)

*Corresponding author: Kianoosh Samimi

Email address: k_samimi@sbu.ac.ir

بررسی تاثیر متغیرهای طرح اختلاط و گونه‌ی خزه بر کیفیت پذیرش زیستی پانل‌های نمای بتنی در اقلیم مدیترانه‌ای

زهرا کوه‌پایه^۱، کیانوش صمیمی^{۲*}، امیررضا اردکانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

اخیرا نمای بتنی پذیرنده زیستی به عنوان یک سیستم نمای سبز خودپایدار، بدون نیاز به مکانیزم‌های تعمیر و آبیاری، توجه مهندسان را به استفاده از آن در اقلیم مدیترانه‌ای جلب نموده است. با این حال به‌کارگیری این نما به دلیل زمان‌بر بودن فرآیند زیست‌پذیری بتن با موانعی روبرو می‌باشد. در این پژوهش به منظور افزایش سرعت و کیفیت زیست‌پذیری بتن با استفاده از مصالح متداول، ۸ نمونه بر مبنای طرح مخلوط شاهد، حاوی سیمان سفید، آب، شن (۸-۴mm) و ریزدانه ماسه (۴-۰mm) با نسبت آب به سیمان ۰/۶، به همراه سه گونه خزه شیت، خزه لیورورت و خزه باربولا به مدت ۱۶ هفته مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج مشخص نمود که افزودن ۵۴ گرم (۲۰٪ از محتوای آب) سرکه سفید به مخلوط پانل شماره ۳ همچنین جایگزینی ۴۰٪ از ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها با ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا در مخلوط پانل شماره ۶، که به طور خاص باعث کاهش سطح PH بستر به مقادیر کمتر از ۱۴ و افزایش ظرفیت جذب آب و تخلخل بتن می‌گردند، مدت زمان زیست‌پذیری پانل‌ها را در مقایسه با نمونه شاهد به ۲۵ روز کاهش داده است. همچنین، جایگزینی سبک‌دانه‌های پومیس با بخشی از ریزدانه در مخلوط پانل شماره ۵ و سبک‌دانه‌های لیکا با بخشی از ریزدانه و درشت‌دانه در مخلوط پانل شماره ۸، منجر به رشد خزه روی سطح پانل‌ها در اواخر هفته پنجم آزمایش گردید. متعاقبا در اواسط هفته شانزدهم آزمایش شواهد رشد خزه روی پانل شماره ۲ با مخلوط حاوی ۴/۵ گرم (۱٪ از وزن سیمان) پودر آلومینیم مشاهده شد. تا پایان هفته شانزدهم آزمایش، نشانه‌هایی مبتنی بر رشد خزه روی نمونه شاهد (پانل شماره ۱)، نمونه حاوی اوره (پانل شماره ۴) و نمونه حاوی درشت‌دانه لیکا و ریزدانه ماسه (پانل شماره ۷) مشاهده نشده است. بر اساس یافته‌ها خزه شیت در تمام نمونه‌ها سریع‌ترین و پایدارترین روند رشد را نشان داده است.

کلمات کلیدی: بتن سبز؛ پذیرش زیستی؛ زیست‌شناسی خزه؛ نمای پذیرنده زیستی؛ نمای سبز خودپایدار.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.458505.3420	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.458505.3420		۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۱۶	۱۴۰۳/۰۶/۱۶	۱۴۰۳/۰۵/۰۷	۱۴۰۳/۰۳/۰۷
کیانوش صمیمی k_samimi@sbu.ac.ir					*نویسنده مسئول: بست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بتن به دلیل استحکام و دوام، یکی از محبوب‌ترین مصالح ساختمانی در جهان می‌باشد که به‌طور فراگیر از آن در صنعت ساختمان سازی استفاده می‌شود [۲ و ۱]. با این وجود به دلیل فرآیند تولید و مصرف سیمان در آن منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردیده و بطور خاص مسئول ۸٪ از میزان کل CO₂^۱ منتشر شده در جهان می‌باشد [۳]. همچنین اخیراً نتایج تحقیقات آشکار می‌سازد که مناطق شهری نیز به عنوان مرکز فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی، موجب انتشار ۷۱ درصد از میزان کل CO₂ منتشر شده می‌باشند که انتظار می‌رود این عدد تا سال ۲۰۳۰ به ۷۶٪ افزایش یابد [۴]. از این رو به عنوان یک چالش مشترک جامعه بین‌المللی، معماران و مهندسان در حال تلاش برای به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی منفی ناشی از صنعت ساختمان در راستای دستیابی به اهداف مورد نظر توافقنامه آب‌وهوایی پاریس در سال ۲۰۱۶ می‌باشند [۵ و ۳]. بدین منظور، یکی از اقدامات صورت گرفته در صنعت ساختمان که دارای نقش مثبتی در کاهش دمای سطوح ساختمانی، جذب آلاینده‌های موجود در هوا، افزایش تنوع زیستی و جداسازی کربن دی‌اکسید از جو می‌باشد، استفاده از نماهای سبز همانند سیستم‌های دیوار زنده^۲ می‌باشد [۶]. با این وجود با توجه به هزینه‌های مورد نیاز قابل توجه در مراحل تعمیر و نگهداری، همچنین نیاز به رعایت الزامات سازه‌ای ویژه در ساخت این گونه نماها، استفاده از این راهکار تا حدودی محدود شده و نیازمند به‌کارگیری ایده‌های بهینه می‌باشد [۷]. در این میان نمای پذیرنده زیستی^۳ به عنوان گونه‌ای جدید از نماهای سبز ضمن برخورداری از مزایای مشابه با سیستم‌های دیوار زنده و در عین حال عدم نیاز به سیستم‌های فنی آبیاری خارجی و تعمیرات و نگهداری و هزینه‌های مربوط به آن، به عنوان یک سیستم نمای سبز خودپایدار و قابل استفاده در اقلیم مدیترانه‌ای، به‌طور خاص مورد توجه قرار گرفته است [۸].

پذیرش زیستی اصطلاحی است که توسط گیلت [۹] در سال ۱۹۹۵ ابداع شده و او آن را «استعداد یک ماده، یا هر جسم بی‌جان دیگری، برای مستعمره شدن توسط یک یا چند گروه از ارگانیسم‌های زنده بدون این که لزوماً تحت هیچ‌گونه تخریب زیستی قرار گیرد.» تعریف نمود. بنابراین اگر ماده‌ای با حساسیت زیستی بالا روی سطوح ساختمان اعمال شود، می‌توان به سطح سبز یا بیوفیلم^۴ متشکل از گیاهانی چون جلبک‌ها، خزه‌ها و گل‌سنگ‌ها دست یافت. این گیاهان در صورت مناسب بودن شرایط بستر رشد، می‌توانند تحت تمام شرایط محیطی طبیعی زنده بمانند [۱۰]. در عین حال چالش اصلی در ایجاد نماهای پذیرنده زیستی بتنی، که از بیوفیلم خزه‌ها بهره می‌برند، با علم بر زمان‌بر بودن وقوع طبیعی پدیده پذیرش زیستی روی سطوح، در خود مواد نهفته است [۱۱]. در این راستا ترن و هوانگ [۱۲] بررسی نمودند که ویژگی‌های مواد همچون زبری سطح بالا، میزان تخلخل زیاد و مقادیر PH در محدوده ۱۰، مهم‌ترین عوامل موثر بر وقوع پدیده پذیرش زیستی و رشد خزه‌ها روی سطوح بتنی می‌باشند. چامیرا اودوتها و همکاران [۱۳] دریافتند که مصالح با درصد تخلخل بالا و میزان مواد آلی زیاد، از پتانسیل بالاتری برای رشد خزه و کپک روی خود برخوردار می‌باشند. کرسی و دیر [۱۴] گزارش دادند که استفاده از بتن پذیرنده زیستی با ویژگی‌هایی همچون میزان تخلخل زیاد و سطوح PH پایین، به دلیل کاهش مقاومت فشاری و افزایش حساسیت بتن در مقابل پدیده ذوب و یخ، در کاربردهای سازه‌ای و بحرانی توصیه نمی‌گردد. ویگر و همکاران [۱۵] بیان داشتند که مفهوم زیست‌پذیری در بتن شامل ایجاد شرایط مناسب برای رشد میکرو ارگانیسم‌ها از جمله ظرفیت کافی جذب آب و مواد مغذی و حفاظت از آن‌ها در برابر عوامل استرس‌زای محیطی می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از سیمان حاوی ۶۲٪ سرباره، سنگدانه‌های رس منبسط شده^۵ (LECA) به میزان ۴۳٪ وزن کل سنگدانه‌ها و افزودنی خاکستر استخوان به میزان ۱۰٪ از وزن سیمان می‌تواند زمان مشاهده اولین شواهد رشد جلبک‌ها را به ۷ روز کاهش دهد. با توجه به نتایج آن‌ها وقوع پدیده پذیرش زیستی روی بتن، تنها به سطوح بتنی با مقادیر PH کمتر از ۱۰ محدود نمی‌باشد. فریبا مصطفی و همکاران [۸] نشان دادند که استفاده از سیمان حاوی ۷۵٪ سرباره می‌تواند مدت زمان پدیدار گشتن اولین شواهد رشد خزه‌ها را به ۶ هفته کاهش دهد. با توجه به نتایج آن‌ها، هندسه سطوح نیز با ایجاد یک خرد اقلیم مناسب رشد خزه‌ها می‌تواند فرآیند پذیرش زیستی بتن و ایجاد یک نمای خودپایدار را مهندسی نموده و رشد گیاهان را در یک سیستم منظم حاصل نماید.

¹ Carbon dioxide

² Living walls

³ Bio-receptivity

⁴ Biofilm

⁵ Light expanded clay aggregate (LECA).

سامود پاتل [۱۶] گزارش داد که استفاده از منیزیم فسفات و اوره به میزان ۰.۶۶٪ و ۰.۸۳٪ از وزن سیمان، و ۲۰ میلی لیتر سرکه می تواند منجر به مشاهده اولین شواهد رشد جلبکها پس از گذشت مدت زمان ۲ هفته گردد.

به کارگیری نماهای پذیرنده زیستی در صنعت ساختمان به دلیل زمان بر بودن وقوع طبیعی پدیده پذیرش زیستی روی سطوح بتنی، همچنین افزایش هزینه های ساخت پانل های بتنی زیست پذیر به دلیل استفاده از مصالح نسبتا گران قیمت همچون منیزیم فسفات، با محدودیت هایی مواجه می باشد. نوآوری این پژوهش دستیابی به طرح اختلاطی است که وقوع پدیده پذیرش زیستی و رشد خزه روی سطوح بتنی را در مقایسه با نتایج سایر تحقیق های صورت گرفته تسریع نموده و همچنین با استفاده از مصالح رایج و در دسترس محلی، منجر به کنترل هزینه های ساخت پانل های پذیرنده زیستی می گردد. این پژوهش به یافتن تاثیر استفاده از مصالح و افزودنی های مختلف در طرح اختلاط بتن و انواع مناسب گونه های موجود خزه، بر تسریع روند زیست پذیری پانل های بتنی نما می پردازد. همچنین، فهرستی از انواع گونه های خزه صخره زی، موجود در کشور، گردآوری شده و جهت شناسایی مناسب ترین گونه ها، شرایط زیستی هر کدام مورد بررسی واقع گردیده است. علاوه بر این، به منظور چشم پوشی از تاثیر متغیرهای مرتبط با هندسه سطحی و بررسی مستقل تاثیر متغیرهای مربوط به طرح اختلاط بتن و گونه خزه بر روند زیست پذیری پانل ها، تلاش شد هندسه پانل ها با اقتباس از برترین هندسه آزموده شده توسط فریبا مصطفی و همکاران [۸] در پژوهش های پیشین انتخاب شود. در نهایت، پس از ساخت پانل ها و اعمال دوغاب تهیه شده از خزه های منتخب بر سطوح آن ها، پانل ها برای بررسی نتایج در شرایط آزمایش قرار گرفتند (شکل ۱).



شکل ۱: روند انجام و پیشرفت پژوهش.

۲- روش آزمایش

۲-۱- تهیه مواد و مصالح

در این مطالعه از سبکدانه های لیکا و پوکه معدنی سفید (پومیس) به عنوان بخشی از سنگدانه جهت استفاده از ویژگی های تخلخل بالا و جذب و نگهداری آب این دانه ها، استفاده شده است. به این منظور از سبکدانه های لیکا (اندازه ذرات $<Amm>$) محصول شرکت Leca و پوکه معدنی سفید (اندازه ذرات $<4mm>$) گروه معدنی سهند استفاده گردید. همچنین، پودر آلومینیم (Al_2O_3) از شرکت فلات کالا و اوره گرانول ($CO(NH_2)_2$) صنایع پتروشیمی کرمانشاه جهت افزایش تخلخل مخلوط بتن تهیه گردید. سیمان سفید از کارخانه سیمان تهران تهیه گردیده است. در این پژوهش از سرکه سفید (CH_3COOH) به منظور کاهش میزان PH مخلوط بتن استفاده شده است.

۲-۲- بررسی، انتخاب و تهیه خزہ

خزہ‌ها گونه‌های گیاهی غیرآوندی و فاقد سیستم ریشه بوده که از ریزوئیدها^۶ برای اتصال به بستر رشد خود استفاده می‌نمایند. آن‌ها مکانیسمی برای ذخیره و انتقال آب در ساختار خود نداشته و از این جهت ساختار خزہ مانند یک اسفنج عمل نموده که آب با اثر موپینگی در آن نفوذ می‌نماید. از این رو، سطح آب موجود در ساختار خزہ‌ها با میزان آب و رطوبت موجود در بستر و محیط اطراف آن‌ها نسبت مستقیم دارد [۱۷]. از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد خزہ‌ها، می‌توان به قابلیت این گیاهان در آغاز مجدد فعالیت متابولیک خود در حضور آب و رطوبت، پس از تحمل یک دوره خشکی کامل اشاره نمود [۱۸]. خزہ‌ها از منظر بستر رشد و استقرار به ۵ گروه خزہ‌های خاک‌زی^۷، خزہ‌های صخره‌زی^۸، خزہ‌های پوست‌نشین^۹، خزہ‌های چوب‌زی^{۱۰} و خزہ‌های آبی^{۱۱} تقسیم‌بندی شده‌اند [۱۹]. در این پژوهش باتوجه به این که بستر رشد خزہ‌ها نوعی سنگ مصنوعی می‌باشد، تلاش شد تا فهرستی از خزہ‌های صخره‌زی تهیه گردیده و از میان آن‌ها به شناسایی و انتخاب گونه‌های موجود در ایران پرداخته شود (جدول ۱). در جدول ۱، ذکر نام ایران (IR) ذیل نام هر خزہ، به موجود بودن آن گونه در کشور اشاره دارد.

جدول ۱: فهرست گردآوری شده از خزہ‌های قابل رشد روی سطوح سنگی، بتنی و سیمانی [۲۰].

نام خزہ	خاستگاه	تصویر	شرایط رشد	ابعاد ساقه
Tortula muralis IR Wall screw moss	سطوح ملات روی دیوارها، روی سازه‌های بتنی و سیمانی، در مناطق شهری		قابل رشد در شرایط محیطی مختلف.	تکه‌های کوسن شکل و با ارتفاع کمتر از ۱ سانتی‌متر.
Orthotrichum diaphanum White-tipped bristle moss	روی سطوح بتنی، سنگی، آجری، در مراکز شهرها		پوست درختان از مناطق مطلوب رشد این گونه می‌باشد.	۱ سانتی‌متر.
Lunularia cruciate IR Crecent-cup liverwort	روی سطوح بتنی، در شکاف میان سنگ‌فرش پیاده روها		حساس به یخ‌زدگی، قابل رشد در مکان‌های مرطوب و سایه‌دار در سکونتگاه‌های انسانی.	برگ‌های بزرگ و منشعب تا عرض ۱۲ میلی‌متر.
Grimmia pulvinata Grey-cushioned grimmia	بالای دیوارها، روی سطح ملات‌ها، روی سنگ قبر، روی سقف‌های بتنی، روی صخره‌ها یا تخته سنگ‌های آهکی		قابلیت تحمل محیط‌های آلوده، قابل رشد روی طیف وسیعی از سطوح با PH متفاوت.	بالشتک‌های مرتب تقریباً خاکستری به ارتفاع ۱ تا ۲ سانتی‌متر.
Brachythecium salebrosum IR Smooth-stalk feather moss	روی سنگ‌ها و زمین‌های مرطوب		مکان‌های سرپناه‌دار مطلوب‌تر است.	ساقه‌های بالارونده به طول ۲ تا ۳ سانتی‌متر.
Amblystegium serpens IR (Creeping feather moss)	سطوح آسفالت، پایین دیوارها، روی سنگ		تقریباً در تمام جهان در مکان‌های مرطوب و سرپناه‌دار.	لکه‌های نامنظم با شاخه‌های به طول ۱ تا ۲ سانتی‌متر.

⁶ Rhizoid

⁷ Terricolous

⁸ Saxicolous

⁹ Corticolous

¹⁰ Lignicolous

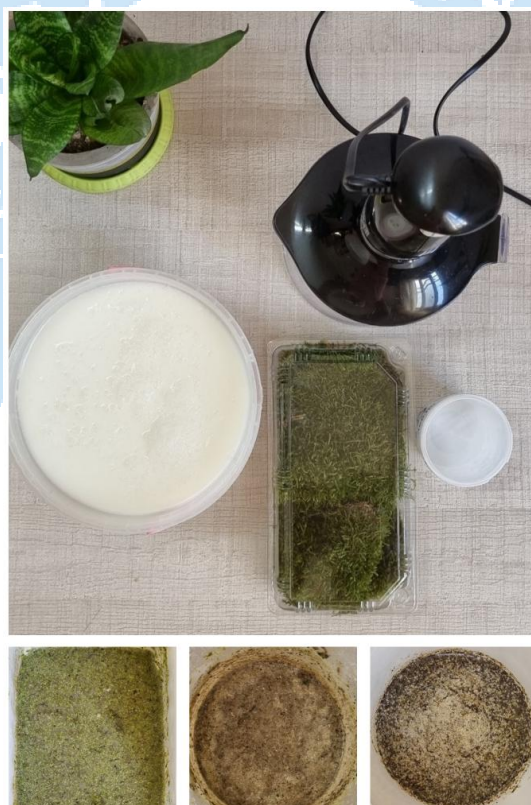
¹¹ Aquatic

۷	Barbula convolute IR Beard moss	زیستگاه‌های باز مانند مسی‌رها و روی دیوارها		سطوح بتنی با رطوبت بین ۵۰ تا ۷۰ درصد مطلوب است. ستاره‌های با حداکثر ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر.	بافت نامنجم و برگ‌های کوچک
۸	Brachythecium rivulare IR River feather moss	روی سنگ‌های مرطوب، پایین دیوارها، روی صخره‌ها		زیستگاه‌های مرطوب مطلوب‌تر است.	ساقه‌های به طول تقریبی ۲/۵ سانتی‌متر.
۹	Brachythecium rutabulum IR Rough-stalked feather moss	روی سنگ‌ها و دیوارها، روی صخره‌ها		در طیف وسیعی از زیستگاه‌ها قابلیت رشد دارد.	توده‌های متراکم با ساقه‌هایی افتاده روی هم به طول ۱۲ سانتی‌متر.
۱۰	Rhynchostegium confertum IR Clustered feather moss	روی سنگ‌ها و سازه‌های دست‌ساز غیراسیدی		در سایه‌روشن‌ها در مناطق روباز.	توده‌هایی با ساقه‌های به طول تا ۱۰ سانتی‌متر.
۱۱	Bryum argenteum IR Silver moss	در مناطق داخلی شهرها، روی سنگ‌ها، آسفالت، جاده‌ها، دیوارها و ساختمان‌ها، در میان ترک‌های روسازی‌های بتنی		قابل رشد در مناطق شهری و انسان‌ساخت.	بالشتک‌های منسجم و متراکم.
۱۲	Bryum caespiticium Tufted thread moss	روی سنگ‌ها، در بالای دیوارها		زیستگاه‌های مرطوب مطلوب‌تر است.	شاخه‌های به طول ۰/۵ تا ۱ سانتی‌متر که در بالای آن‌ها دسته‌های متراکم از برگ وجود دارد.
۱۳	Bryum dichotomum IR Bicoloured bryum	روی بام‌ها، دیوارها و سنگ‌ها		خاک رس‌های غنی، از مناطق مطلوب رشد این گونه می‌باشد.	شاخه‌های فشرده یا گسترده با طول معمول کمتر از ۱ سانتی‌متر.
۱۴	Bryum capillare IR Capillary thread moss	روی صخره‌ها		محیط‌های قلیایی تا کمی اسیدی مطلوب‌تر است.	توده‌هایی با ساقه‌های به طول ۱ تا ۳ سانتی‌متر.
۱۵	Purpureus ceratodon Redshank	در محیط‌های شهری و صنعتی، روی دیوارهای سنگی، میان ترک‌های پیاده‌روها		قابلیت تحمل محیط‌های آلوده، قابل رشد روی طیف وسیعی از سطوح اسیدی.	بالشتک‌هایی به رنگ زرد یا سبز متوسط تا قرمز با شاخه‌هایی حداکثر به طول ۳ سانتی‌متر.
۱۶	Leptodictyum riparium IR Kneiff's feather moss	در میان فرو رفتگی‌های بتنی، روی سنگ‌ها		قابلیت تحمل محیط‌های آلوده، دماهایی بسیار پایین یا بالا، مناطق با آب‌وهوای معتدل.	شاخه‌های نامنظم سبز تیره به طول ۲ تا ۳ سانتی‌متر.
۱۷	Hypnum Cupresiforme IR Sheet moss	روی سنگ‌ها، صخره‌ها و دیوارهای بتنی		قابل رشد در سرتاسر جهان حتی محیط‌های بسیار آلوده، قابل رشد بر بسترهای خنثی تا قلیایی.	بالشتک‌های منسجم متشکل از ساقه‌های منفرد و ریز که به سمت بیرون رشد می‌نمایند.

باتوجه به اطلاعات ذکر شده در جدول ۱، و بر اساس بررسی گونه‌های مختلف خزه موجود در کشور، سه گونه خزه لیورورت^{۱۲}، خزه باربولا^{۱۳} و خزه شیت^{۱۴} با نام‌های علمی لونولاریا کریشیاتا^{۱۵}، باربولا کانولوت^{۱۶} و هیپنوم کوپرسیفرم^{۱۷}، ارائه شده در ردیف‌های ۳، ۷ و ۱۷ جدول فوق، جهت استفاده در آزمایش انتخاب و از فروشگاه بست ماس^{۱۸} تهیه گردیدند.

۲-۳- تکثیر و تهیه دوغاب خزه

خزه‌ها از طریق پراکندگی اندامی به نام اسپور^{۱۹} و به صورت غیرجنسی، با استفاده از مکانیسم‌هایی چون پخش اسپورها توسط باد یا حشرات، تقسیم خزه به قطعات بسیار کوچک و ساخت دوغاب خزه تولید مثل می‌نمایند. به این صورت که قسمت کوچکی از ساختار یک خزه می‌تواند منجر به تولید تعداد زیادی گیاه بزرگ‌تر و کامل گردد. همچنین، این گیاهان به تدریج و با رشد و گسترش در طول زمان، قادر به پوشش بخش قابل توجهی از سطح بستر خویش می‌باشند [۲۱]. در این پژوهش، از روش ساخت دوغاب برای تکثیر و اعمال گونه‌های خزه بر روی سطح پانل‌های بتنی استفاده شده است. به این منظور ۲۴۰ سی‌سی خزه با ۳۶۰ سی‌سی دوغ ساده ترکیب و با استفاده از مخلوط‌کن برقی به مخلوطی قوام یافته تبدیل گشت (شکل ۲). سپس مخلوط‌کن خاموش گردیده و مخلوط حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای 24 ± 2 آزمایشگاه باقی ماند. متعاقباً مخلوط بدست آمده با کمک یک برس روی مناطق خواسته شده از سطح پانل‌های بتنی اعمال گردید [۸]. استفاده از این روش با فراهم نمودن محیطی اسیدی، منجر به تسریع فرآیند تکثیر این گیاهان به ویژه بر روی سطوح سنگی می‌گردد [۱۷].



دوغاب خزه باربولا دوغاب خزه لیورورت دوغاب خزه شیت

¹² Liverwort moss

¹³ Barbula moss

¹⁴ Sheet moss

¹⁵ Lunularia cruciata

¹⁶ Barbula convolute

¹⁷ Hypnum cupresiforme

¹⁸ Best moss

¹⁹ Spores

شکل ۲: ساخت دوغاب خزه‌های منتخب برای آزمایش.

۲-۴- روند اختلاط و آماده سازی پانل‌های بتنی

در این پژوهش از یک مخلوط کن ۶ لیتری برای تولید تمامی مخلوط‌های بتنی مورد نظر استفاده گردید. فرآیند اختلاط بدین گونه صورت گرفت که در ابتدا کلیه مصالح پودری و سنگدانه‌ها درون مخلوط کن ریخته و به مدت یک دقیقه با سرعت کم مخلوط شدند. سپس میزان آب مورد نظر به ترکیب اضافه گشته و مخلوط به مدت سه دقیقه با سرعت کم و در مرحله بعد مجدداً یک دقیقه با سرعت بالا مخلوط شد (شکل ۳). پس از آن، مخلوط بدست آمده درون قالب‌ها ریخته شده و پس از الصاق برچسب مشخصات، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه با دمای 24 ± 2 قرار گرفتند (شکل ۴). در این مدت سطح تمامی نمونه‌ها با پارچه مرطوب پوشانده شده و پس از گذشت ۲۴ ساعت پانل‌ها از قالب خارج گردیدند.



شکل ۳: ساخت مخلوط بتن در مخلوط‌کن.



شکل ۴: قرارگیری نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه.

۲-۵- طرح اختلاط

در این پژوهش هشت طرح اختلاط با نسبت آب به مواد سیمانی^{۲۰} (W/C_m) در بازه‌ی ۰/۶ الی ۰/۶۲ [۲۲] با استفاده از سیمان سفید در نظر گرفته شده است (جدول ۲). طرح اختلاط بر پایه سیمان سفید، آب، درشت‌دانه^{۲۱} (CA) شن (اندازه ذرات >۸mm) و ریزدانه^{۲۲} (FA) ماسه (اندازه ذرات >۴mm) با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۶، به عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد. علاوه بر این، به منظور بررسی اثر سبک‌دانه‌های پوکه معدنی سفید و لیکا، طرح شماره ۵ حاوی شن به عنوان درشت‌دانه و ترکیب ماسه و پومیس به عنوان ریزدانه، طرح شماره ۶ حاوی ترکیب شن و لیکا به عنوان درشت‌دانه و ترکیب ماسه و پومیس به عنوان ریزدانه، طرح شماره ۷ حاوی لیکا به عنوان درشت‌دانه و ماسه به عنوان ریزدانه و طرح شماره ۸ حاوی لیکا به عنوان درشت‌دانه و ترکیب ماسه و لیکا به عنوان ریزدانه در نظر گرفته شدند. همچنین، سه طرح مخلوط دیگر بر پایه طرح شاهد (پانل شماره ۱) شامل طرح شماره ۲ حاوی پودر آلومینیم^{۲۳}، طرح شماره ۳ حاوی سرکه^{۲۴} و طرح شماره ۴ حاوی اوره ارائه شد که نسبت انتخابی این مواد بر اساس یافته‌های حاصل از پژوهش‌های پیشین در ارتباط با تاثیر آن‌ها بر میزان تخلخل و PH بتن، به طور خاص به میزان ۱٪ از وزن سیمان [۲۳]، ۲۰٪ از حجم آب مخلوط [۱۶] و ۸٪ از وزن سیمان [۲۴] تعیین گردید.

جدول ۲: طرح اختلاط پانل‌ها

	Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	CA (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	Superplasticizer (kg/m ³)	Pumice (kg/m ³)	LECA 0-4mm (kg/m ³)	LECA 4-8mm (kg/m ³)	Aluminium powder (kg/m ³)	Vinegar (kg/m ³)	Urea (kg/m ³)	W/C _m
1	450	270	790	790	-	-	-	-	-	-	-	0.6
2	450	270	790	790	-	-	-	-	4.5	-	-	0.6
3	450	216	790	790	-	-	-	-	-	54	-	0.6
4	450	270	790	790	-	-	-	-	-	-	36	0.6
5	450	270	700	414	1.5	316	-	-	-	-	-	0.6
6	450	280	360	378	1	252	-	240	-	-	-	0.62
7	450	270	-	790	-	-	-	790	-	-	-	0.6
8	450	280	-	680	1	-	120	433.5	-	-	-	0.62

Panels



Design No.

1

2

3

4

5

6

7

8

۲-۶- شرایط آزمایش

در این تحقیق برای فراهم نمودن شرایط آب‌وهوایی مشابه با اقلیم مدیترانه‌ای، که اختلاف کمینه دمای زمستان و بیشینه دمای تابستان آن مقدار کنترل شده‌ای می‌باشد، گلخانه «نیلوفر آبی» واقع در شهرستان شهریار استان تهران برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد. در این گلخانه با بهره‌گیری از سیستم‌های کنترلی حساس به مقادیر حداکثر و حداقل دما و نیز مکانیزم‌های مه‌پاش برای تنظیم و حفظ شرایط دما و رطوبت مطلوب، به طور مداوم مقادیر دمایی از ۲۳ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد و سطوح رطوبت در بازه‌ی ۶۰ تا ۷۵ درصد حفظ گردید. در این مرحله از پژوهش ضمن مشخص شدن محل انجام آزمایش، دوغاب خزه روی سطح پانل‌ها اعمال شده و نمونه‌ها برای قرارگیری در شرایط آزمایش به گلخانه مورد نظر منتقل شدند (شکل ۵). ابتدا پانل‌ها به مدت دو هفته به صورت افقی درون سینی‌هایی که

²⁰ Water-cement ratio (W/C_m).

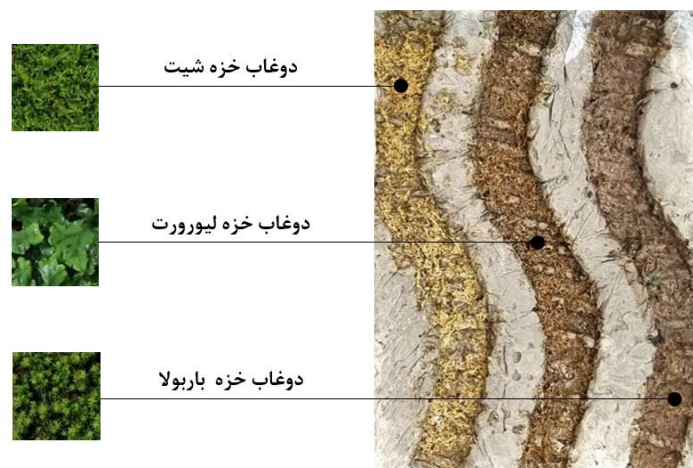
²¹ Coarse aggregates (CA).

²² Fine aggregates (FA).

²³ Aluminium powder

²⁴ Vinegar

از آب مقطر پر شده بود قرار گرفتند. این عمل به منظور اطمینان از حفظ رطوبت اولیه لازم برای رشد خزہ از طریق جذب آب با استفاده از خاصیت موئینگی و همچنین حفظ مقادیر ثابت رطوبت در سطح پانل‌ها، صورت پذیرفت. متعاقباً، پس از گذشت مدت زمان دو هفته، آب موجود در سینی‌ها تخلیه و پانل‌ها به واسطه اسپری نمودن آب مقطر روی سطح آن‌ها از فاصله تقریبی ۳۰ سانتی‌متری مرطوب نگهداشته شدند. این روند در فواصل ۴ ساعته، به تعداد ۳ بار به انجام رسید و در طول این بازه زمانی، پیشرفت رشد خزہ‌ها با دقت مشاهده و به صورت بصری برداشت شد (شکل ۶).



شکل ۵: اعمال دوغاب خزہ روی پانل‌ها.





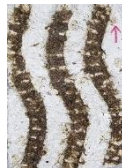




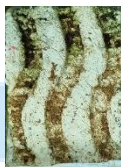


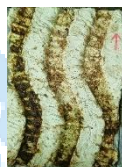







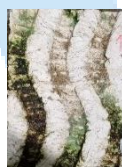






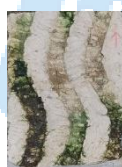












شکل ۶: قرارگیری پانل‌ها در شرایط آزمایش.

۳- نتایج

در جدول ۳ نتایج بدست آمده از روند رشد خزہ‌ها روی پانل‌های بتنی ارائه شده است (جدول ۳). بر اساس این نتایج، شواهد اولیه رشد خزہ در اواسط هفته چهارم آزمایش و پس از گذشت ۲۵ روز از قرارگیری پانل‌ها در محیط گلخانه، روی پانل حاوی سرکه (پانل شماره ۳) و پانل حاوی درشت‌دانه شن و لیکا و ریزدانه ماسه و پومیس (پانل شماره ۶) آشکار گردید.

جدول ۳: نتایج بدست آمده از ثبت روند رشد خزها روی پانل‌ها.

	Panel No. 1	Panel No. 2	Panel No. 3	Panel No. 4	Panel No. 5	Panel No. 6	Panel No. 7	Panel No. 8
Week 1								
Week 4								
Week 8								
Week 12								
Week 16								

استفاده از سرکه و نقش آن در کاهش میزان PH مخلوط بتن، عامل اصلی رشد خزها روی پانل شماره ۳ در مدت زمان کوتاه‌تر در مقایسه با نمونه شاهد و سایر نمونه‌ها به غیر از پانل شماره ۶ می‌باشد. زیرا با کاهش PH بتن به مقادیر کمتر از ۱۴، خاصیت قلیایی بستر رشد نیز کاهش یافته و در نتیجه شرایط مطلوب‌تری برای تکثیر گونه‌های خزها، که عمدتاً علاقه‌مند به زیستن در محیط‌های اسیدی می‌باشند، فراهم می‌گردد [۱۷]. بنابراین سرعت رشد و تکثیر خزها روی پانل شماره ۳ افزایش یافته است. همچنین، بهره‌گیری از ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا به عنوان بخشی از سنگدانه در طرح مخلوط پانل شماره ۶، به دلیل میزان تخلخل^{۲۵} و ظرفیت جذب آب^{۲۶} بالای این سبکدانه‌ها [۲۵]، منجر به تسریع فرآیند رشد گونه‌های خزها روی سطح این پانل در مدت زمان مشابه با پانل شماره ۳ گردید (جدول ۴). اثر مشترک ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا بر افزایش میزان جذب آب و تخلخل بتن، همچنین ظرفیت

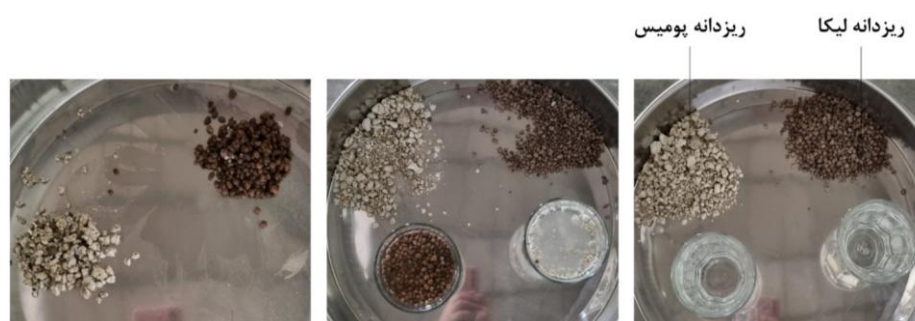
²⁵ Porosity

²⁶ Water absorption

سبک دانه‌های پومیس برای حفظ طولانی مدت رطوبت در مقایسه با سبکدانه‌های لیکا (شکل ۷) باعث حفظ سطوح رطوبت در پانل شماره ۶ برای مدت زمان طولانی‌تر نسبت به سایر پانل‌ها شد. این تاثیر به ویژه از هفته سوم آزمایش، که طی آن پانل‌ها پس از تخلیه آب موجود در سینی‌ها به طور منظم با اسپری آب هر ۴ ساعت یک بار مرطوب می‌شدند با حفظ مقادیر بیشتری از رطوبت در ساختار پانل منجر به فراهم آوردن شرایط زیستی و رطوبتی مطلوب گردیده و متعاقباً فرآیند رشد خزها را سرعت بخشید.

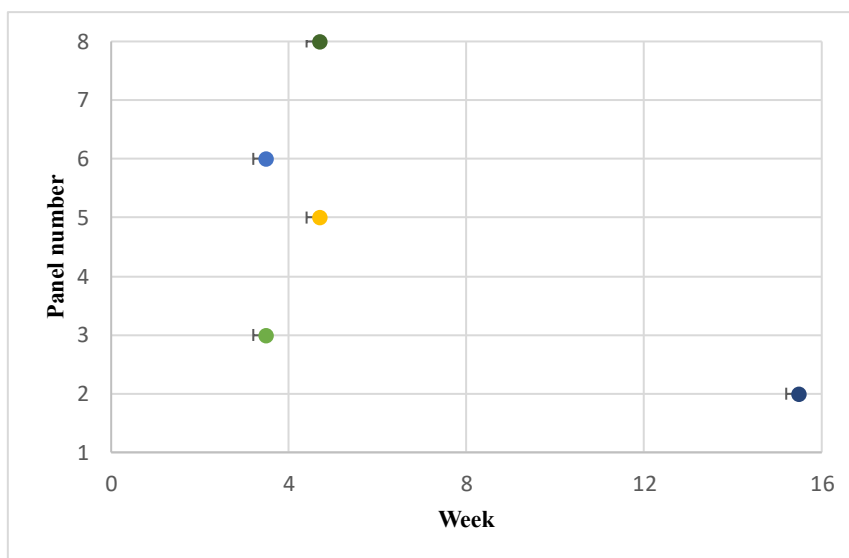
جدول ۴: خواص فیزیکی و شیمیایی سبکدانه‌های پومیس و لیکا [۲۵].

	Water absorption percentage	Porosity rate	PH level
Pumice aggregate	3.8%	56.22	6.47
LECA aggregate	0.9%	78.20	6.76



شکل ۷: مقایسه مدت زمان حفظ رطوبت در ریزدانه‌های لیکا و پومیس پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در آب.

به همین صورت، استفاده از سبکدانه پومیس در طرح مخلوط پانل شماره ۵ حاوی شن به عنوان درشت‌دانه و ترکیب ماسه و پومیس به عنوان ریزدانه، و سبکدانه لیکا در طرح مخلوط پانل شماره ۸ حاوی لیکا به عنوان درشت‌دانه و ترکیب ماسه و لیکا به عنوان ریزدانه، با افزایش نسبی میزان جذب آب و تخلخل بتن، باعث شدند تا اولین شواهد رشد خز روی این پانل‌ها در بازه‌ی زمانی اواخر هفته پنجم آزمایش مشاهده گردد. از سوی دیگر، اولین نشانه‌های رشد خز روی پانل حاوی پودر آلومینیم (پانل شماره ۲) در اواسط هفته شانزدهم آزمایش پدیدار گشت. زیرا فزودن پودر آلومینیم در ترکیب مخلوط این پانل، شکل‌گیری حباب‌های هوا را در مخلوط بتن تسهیل نموده و باعث تشکیل منافذ متصل در سراسر ساختار بتن گردید. از این رو، تاثیر مثبتی بر افزایش میزان تخلخل آن داشته و در نتیجه فرآیند زیست‌پذیری بتن را تسریع نموده است [۲۲]. همچنین مطالعه نتایج ارائه شده در جدول ۳ مشخص نمود که تا پایان هفته شانزدهم آزمایش، هیچ گونه شواهدی مبتنی بر رشد خز روی نمونه شاهد (پانل شماره ۱)، نمونه حاوی اوره (پانل شماره ۴) و نمونه حاوی لیکا به عنوان درشت‌دانه و ماسه به عنوان ریزدانه (پانل شماره ۷) مشاهده نشده است (شکل ۸).

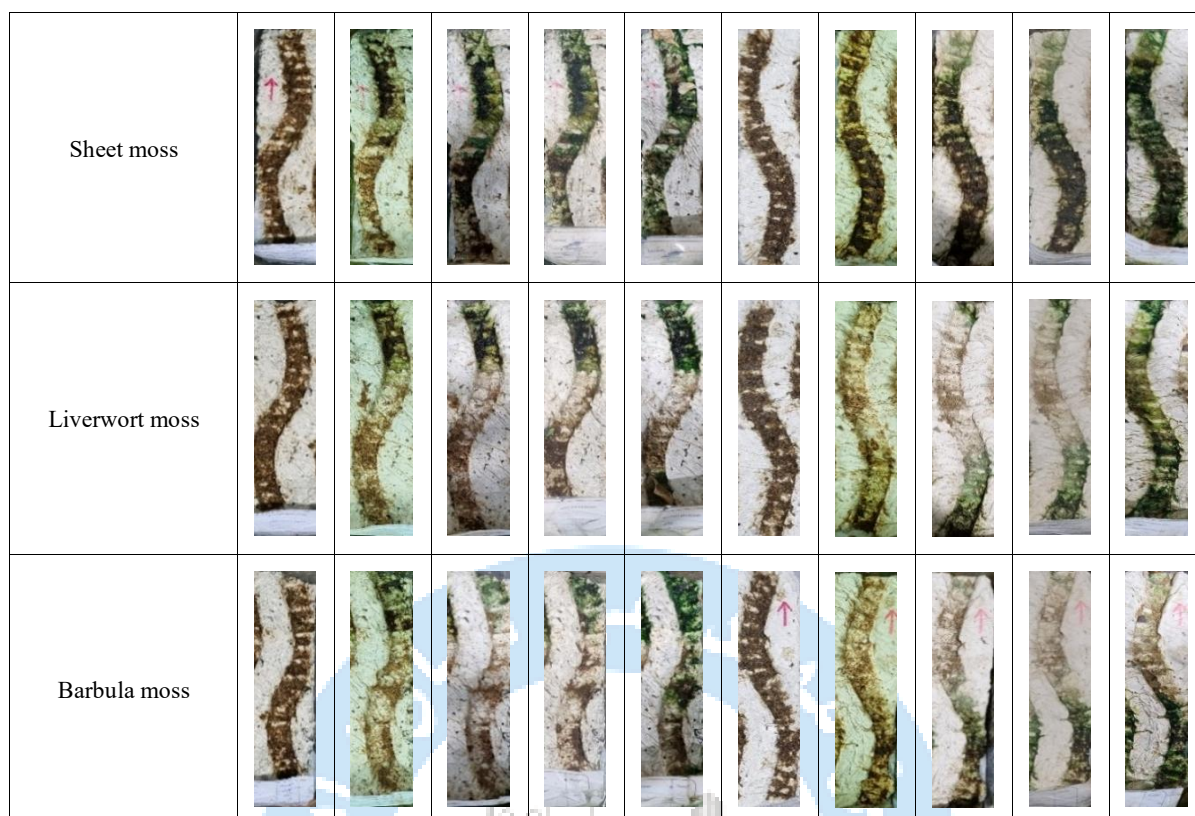


شکل ۸: محدوده زمانی مشاهده اولین شواهد رشد خزّه روی هر یک از پانل‌های مورد آزمایش.

بررسی روند رشد و تکثیر گونه‌های خزّه روی تمام نمونه‌ها، به خصوص پانل‌های شماره ۳ و ۶، در طول مدت شانزده هفته، نمایان ساخت که از میان سه گونه خزّه لیورورت، خزّه باربولا و خزّه شیت که جهت انجام آزمایش برگزیده و پس از تهیه دوغاب روی سطوح پانل‌ها اعمال شده بودند، سریع‌ترین زمان و پایدارترین الگوی رشد مختص به خزّه شیت با نام علمی هیپنوم کوپرسیفرم بوده است (جدول ۵). ظرفیت قابل توجه خزّه شیت در تاب آوری سطوح بالای آلودگی محیط و مجموعه متنوعی از بسترهای سنگی با مقادیر PH متفاوت، منجر به رشد مطلوب‌تر و سریع‌تر این خزّه روی پانل‌های بتنی در مقایسه با سایر گونه‌ها شده است. بر اساس نتایج ذکر شده در بالا، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاط ۵۴ گرم سرکه سفید (۲۰٪ از محتوای کل آب مخلوط) در طرح اختلاط پانل شماره ۳، همچنین جایگزینی ۴۰٪ از ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها با ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا در طرح اختلاط پانل شماره ۶، همراه با استفاده از دوغاب تشکیل شده از خزّه شیت، می‌تواند مدت زمان وقوع پدیده پذیرش زیستی روی پانل‌های بتنی را به ۲۵ روز کاهش دهد. علت وقوع این اتفاق مرتبط با کاهش میزان خاصیت قلیایی بستر رشد و متعاقباً دستیابی به مشابهت بیشتر با شرایط رشد خزّه‌ها در محیط طبیعی با استفاده از سرکه سفید با PH در محدوده ۴/۵ الی ۵/۵ در طرح مخلوط بتن می‌باشد. همچنین اثر ترکیبی ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا بر افزایش ظرفیت جذب آب و تخلخل بتن، رطوبت را که وجود آن برای انجام فرآیند لقاح و فوتوسنتز خزّه‌ها ضروری می‌باشد، برای مدت زمان طولانی‌تری در ساختار بتن حفظ می‌نماید. در این پژوهش تاثیر مثبت دو عامل کاهش میزان PH و افزایش ظرفیت جذب آب و تخلخل بتن، بر کاهش مدت زمان و افزایش کیفیت وقوع پدیده پذیرش زیستی روی پانل‌های بتنی با نتایج بدست آمده از پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد [۸، ۱۵ و ۱۶].

جدول ۵: الگوی رشد گونه‌های خزّه روی پانل‌های شماره ۳ و ۶.

		Panel No. 3					Panel No. 6				
Week		1	4	8	12	16	1	4	8	12	16
Species											



۴- نتیجه گیری

این پژوهش بر روی بررسی تاثیر استفاده از مصالح و ترکیبات مختلف در طرح مخلوط بتن و همچنین نوع خزه مورد استفاده، بر فرآیند زیست‌پذیری پانل‌های بتنی نما متمرکز شده است. هدف از انجام این تحقیق، افزایش سرعت و کیفیت وقوع پدیده پذیرش زیستی روی سطوح بتنی با رویکرد استفاده از مصالح متداول و در دسترس می‌باشد. این عمل به منظور مدیریت و کنترل هزینه‌های ساخت پانل‌ها، و معرفی نمای پذیرنده زیستی به عنوان یک سیستم نمای سبز خودپایدار جهت استفاده در اقلیم مدیترانه‌ای صورت گرفته است. مهم‌ترین نتایج این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:

۱. پانل حاوی سرکه (پانل شماره ۳) و پانل حاوی ترکیب شن و لیکا به عنوان درشت‌دانه و ترکیب ماسه و پومیس به عنوان ریزدانه (پانل شماره ۶) سریع‌ترین رشد خزه را پس از گذشت ۲۵ روز از شروع آزمایش در مقایسه با نمونه‌های دیگر از خود نشان دادند. زیرا استفاده از ۵۴ گرم (۲۰٪ از محتوای کل آب مخلوط) سرکه سفید در ترکیب مخلوط بتن پانل شماره ۳، با کاهش مقادیر PH بستر از خاصیت قلیایی محیط رشد کاسته و شرایط مطلوب‌تری برای تکثیر گونه‌های خزه که عمدتاً در زیستگاه‌های اسیدی رشد می‌کنند فراهم می‌نماید.
۲. جایگزینی ۴۰٪ از ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها با ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا در طرح اختلاط پانل شماره ۶، به واسطه اثر مشترک ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا بر افزایش ظرفیت جذب آب و تخلخل بتن منجر به حفظ سطوح بیشتری از رطوبت مورد نیاز رشد خزه‌ها در ساختار بتن برای مدت زمان طولانی‌تر در مقایسه با سایر پانل‌ها و تسریع فرآیند پذیرش زیستی روی سطوح بتنی می‌گردد.
۳. استفاده از ریزدانه‌های پومیس و سبک‌دانه‌های لیکا به عنوان بخشی از ترکیب سنگ‌دانه‌ها در طرح مخلوط بتن منجر به تسریع فرآیند رشد گونه‌های خزه روی سطوح بتنی در مقایسه با نمونه شاهد می‌گردد. از این رو، در مقایسه با مدت زمان رشد خزه

روی پانل شماره ۶ می‌توان استنباط نمود که کاربرد همزمان ریزدانه‌های پومیس و درشت‌دانه‌های لیکا در ترکیب مخلوط بتن، تاثیر مطلوب تری بر افزایش ظرفیت جذب آب و میزان تخلخل، و در نتیجه زیست‌پذیری پانل‌های بتنی می‌گذارد.

۴. با توجه به ظهور نشانه‌های رشد خزہ روی نمونه حاوی پودر آلومینیم (پانل شماره ۲) در اواسط هفته شانزدهم آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ۴/۵ گرم پودر آلومینیم (۱٪ از وزن سیمان) به ترکیب مخلوط بتن، ضمن تسهیل شکل‌گیری حباب‌های هوا و تشکیل منافذ متصل در سراسر ساختار آن تاثیر مثبتی بر افزایش میزان تخلخل پانل داشته، و در نتیجه در مقایسه با نمونه شاهد فرآیند رشد خزہ‌ها روی سطوح بتنی را تسریع می‌نماید.

۵. پس از بررسی ویژگی خزہ‌های صخره‌زی سه گونه خزہ لیورورت، خزہ باریولا و خزہ شیت برای ساخت دوغاب خزہ انتخاب گردیدند. نتایج نشان داد سریع‌ترین زمان و پایدارترین الگوی رشد در طول شانزده هفته آزمایش مختص به گونه خزہ شیت می‌باشد.

۶. بررسی یافته‌ها نشان داد که تا پایان هفته شانزدهم آزمایش، هیچ نشانه‌ای مبتنی بر رشد و تکثیر خزہ روی نمونه شاهد (پانل شماره ۱)، طرح مخلوط حاوی اوره گرانول به میزان ۸٪ از وزن سیمان (پانل شماره ۴) و طرح مخلوط حاوی سبکدانه‌های لیکا به عنوان درشت‌دانه (پانل شماره ۷) مشاهده نمی‌شود.

با توجه به نتایج حاصل شده از این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد نسبت بهینه استفاده از سبکدانه‌های لیکا و پومیس در طرح مخلوط بتن، همچنین عملکرد پانل‌های پذیرنده‌زیستی در شرایط محیطی کنترل نشده، در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد.

قدردانی

نویسندگان مقاله تشکر ویژه‌ای از جناب آقای دکتر سعید شیرزادیان دانشیار علوم گیاهی موسسه تحقیقات گیاه پزشکی کشور در بخش تحقیقات رستنی‌ها به‌منظور راهنمایی در حوزه گیاه‌شناسی این پژوهش دارند. همچنین، نویسندگان مقاله به‌طور ویژه از شرکت دانش بنیان توسعه فناوریان سبز کارا (کلینیک بتن سبز) جهت کمک در انجام بعضی از آزمایش‌ها قدردانی می‌نمایند.

مراجع:

- [1] Samimi, K., Pakan, M., & Eslami, J. (2023). Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions. *Journal of Building Engineering*, 68, 106126. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106126>
- [2] Samimi, K., Farahani, M., Pakan, M., & Shirzadi Javid, A. A. (2022). Influence of pumice and metakaolin on compressive strength and durability of concrete in acidic media and on chloride resistance under immersion and tidal conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 1153-1175. <https://doi.org/10.1007/S40996-021-00637-4>
- [3] Sun, R. S., Gao, X., Deng, L. C., & Wang, C. (2022). Is the Paris rulebook sufficient for effective implementation of Paris Agreement?. *Advances in Climate Change Research*, 13(4), 600-611. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.05.003>
- [4] Huang, Y., Zheng, Y., Li, J., Liao, Q., Fu, Q., Xia, A., ... & Sun, Y. (2018). Enhancing microalgae biofilm formation and growth by fabricating microgrooves onto the substrate surface, *Bioresource technology*, 261, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.139>
- [5] Samimi, K., & Zareechian, M. (2022). Chemical resistance of synthesized graphene-modified cement paste containing natural pozzolans to acid attack. *Journal of Building Engineering*, 60, 105174. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105174>
- [6] Perini, K., Ottel , M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 1(1), 1-8. <https://doi.org/10.4236/OJE.2011.11001>
- [7] Price, A., Jones, E. C., & Jefferson, F. (2015). Vertical greenery systems as a strategy in urban heat island mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 1-11. <https://doi.org/10.1007/S11270-015-2464-9>
- [8] Mustafa, K. F., Prieto, A., & Ottele, M. (2021). The role of geometry on a self-sustaining bio-receptive concrete panel for facade application, *Sustainability*, 13(13), 7453. <https://doi.org/10.3390/su13137453>

- [9] Guillitte, O., & Dreesen, R. (1995). Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials. *Science of the total environment*, 167(1-3), 365-374. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04596-S](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04596-S)
- [10] Whitton, B. A. (Ed.). (2012). *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in space and time*. Springer Science & Business Media.
- [11] Cruz, M., & Beckett, R. (2016). Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality. *Arq: Architectural Research Quarterly*, 20(1), 51-64. <https://doi.org/10.1017/S1359135516000130>.
- [12] Tran, T. H., & Hoang, N. D. (2017). Estimation of algal colonization growth on mortar surface using a hybridization of machine learning and metaheuristic optimization. *Sādhanā*, 42, 929-939. <https://doi.org/10.1007/S12046-017-0652-6>
- [13] Udawattha, C., Galkanda, H., Ariyaratne, I. S., Jayasinghe, G. Y., & Halwatura, R. (2018). Mold growth and moss growth on tropical walls. *Building and Environment*, 137, 268-279. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.04.018>
- [14] McCarthy, M. J., & Dyer, T. D. (2019). Pozzolanas and pozzolanic materials. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5, 363-467. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00009-5>
- [15] Veeger, M., Ottelé, M., & Prieto, A. (2021). Making bioreceptive concrete: Formulation and testing of bioreceptive concrete mixtures. *Journal of Building Engineering*, 44, 102545. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102545>
- [16] Patel, S. BIO-RECEPTIVE CONCRETE FOR BUILDING FAÇADE APPLICATION.
- [17] Haynes, A., Popek, R., Boles, M., Paton-Walsh, C., & Robinson, S. A. (2019). Roadside moss turfs in South East Australia capture more particulate matter along an urban gradient than a common native tree species. *Atmosphere*, 10(4), 224. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10040224>
- [18] Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A.H., Li, G., Zhu, J.W. et al. (2015), Mechanical properties and microstructure of Marschall, M. (2017). Ecophysiology of bryophytes in a changing environment. *Acta Biologica Plantarum Agriensis*, 5(2), 61-70. <https://doi.org/10.21406/ABPA.2017.5.1.34>
- [19] La Farge-England, C. (1996). Growth form, branching pattern, and perichaetial position in mosses: cladocarp and pleurocarpy redefined. *Bryologist*, 170-186. <https://doi.org/10.2307/3244546>
- [20] British Bryological Society. (2021, September 29). *Species finder - British Bryological Society*. <https://www.britishbryologicalsociety.org.uk/learning/species-finder/>
- [21] Charron, A. J., & Quatrano, R. S. (2009). Between a rock and a dry place: the water-stressed moss. *Molecular Plant*, 2(3), 478-486. <https://doi.org/10.1093/MP/SSP018>
- [22] Day, K. W. (2006). *Concrete mix design, quality control and specification*. CRC press. <https://doi.org/10.4324/9780203967874>
- [23] Van, L. T., Kim, D. V., Xuan, H. N., Dinh, T. V., Bulgakov, B., & Bazhenova, S. (2019). Effect of aluminium powder on light-weight aerated concrete properties. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 97, p. 02005). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20199702005>
- [24] Su, H., Luan, Y., Ma, Q., Hu, B., Liu, S., & Bai, Y. (2022). Effect of Different Temperatures on the Hydration Kinetics of Urea-Doped Cement Pastes. *Materials*, 15(23), 8343. <https://doi.org/10.3390/ma15238343>
- [25] Pérez-Urrestarazu, L., Fernández-Cañero, R., Campos-Navarro, P., Sousa-Ortega, C., & Egea, G. (2019). Assessment of perlite, expanded clay and pumice as substrates for living walls. *Scientia horticultrae*, 254, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.078>