Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 15, No. 4, Page 473 - 490 (2025)

DOI: 10.22034/ijwp.2024.2037019.1678

Evaluation of the performance of special pozzolanic Portland cement and Portland cement type 1-425 on the properties of cement wood fabricated from wood particle of pistachio tree branches

Massood Khanamani[1], Mohammad Shamsian[2], Mohammad Arabi[3*]

1- Msc Student, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran
2- Associate Professor, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran.
3- Corresponding author, Assistant Professor, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: marabi@uoz.ac.ir

Received: July 2024 Accepted: October 2024

Abstract

Problem definition and objectives: The primary challenge in manufacturing wood-cement composites is the chemical incompatibility between wood and cement, which reduces the setting time and hardening of the cement and disrupts the cement hydration process. The goal of this study was to employ special pozzolanic cement to mitigate the incompatibility between wood and cement, improve cement hydration performance, and enhance the physical and mechanical properties of wood-cement composites.

Methodology: Pistachio wood particles (with thicknesses ranging from 0.3 to 4 mm and lengths from 0.3 to 16 mm), Portland cement type 1-425, and special pozzolanic cement were sourced from Neopan Factory in Rafsanjan and Kerman Cement, respectively. The variable factors included different ratios of special pozzolanic cement to pistachio branch wood particles (50:50, 60:40, and 70:30) and varying concentrations of calcium chloride (3% and 5%). To compare the effects of special pozzolanic Portland cement with standard Portland cement type 1-425, a control treatment was established using type 1-425 Portland cement and pistachio wood particles in a 60:40 ratio with 5% calcium chloride. The Vicat test, mechanical tests for flexural strength and elastic modulus, and physical tests for water absorption and thickness swelling at 2 and 24 hours were conducted to assess the properties of wood cement composite in accordance with international standard protocols.

Results: The results of the Vicat test indicated that type 1-425 cement sets faster than special pozzolanic cement. Additionally, increasing the amount of calcium chloride and adding wood particles to the wood-cement mixture reduced both the setting time and the depth of Vicat needle penetration. The findings further demonstrated that under similar conditions (60% cement, 40% pistachio wood particles, and 5% calcium chloride), special pozzolanic Portland cement significantly outperformed type 1-425 Portland cement in enhancing the physical and mechanical properties of wood-cement boards. This led to increases in flexural strength and elastic modulus by 54% and 11%, respectively, while reducing water absorption and thickness swelling at 2 and 24 hours by 6%, 13%, 31%, and 26%, respectively. Furthermore, samples made with 60% type 1-425

cement and 40% wood particles exhibited higher water absorption and thickness swelling compared to those made with special pozzolanic cement under similar conditions after 2 and 24 hours of immersion in water.

Conclusion: The findings indicated that wood-cement produced with special pozzolanic cement exhibited superior physical and mechanical properties compared to that made with type 1-425 Portland cement. Due to its lighter weight relative to concrete, this composite can be effectively utilized in prefabricated structures, including non-load-bearing walls, partitions, internal building coverings, fire-resistant doors, and sound insulation.

Keywords: Wood-cement particleboard, special pozzolanic cement, physical and mechanical properties, pistachio wood Particle.

ارزیابی عملکرد سیمان پرتلند پوزولانی ویژه و سیمان پرتلند تیپ ۱-۵۴۲ بر عملکرد چوب سیمان ساخته شده از خرده چوب سرشاخه‌های درخت پسته

مسعود خنامانی[۱]، محمد شمسیان[۲]، محمد عربی[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۲- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل، ایران. پست الکترونیک: marabi@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: مهر ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: مشکل اصلی برای ساخت کامپوزیت‌های چوب–سیمان، ناسازگاری شیمیایی بین چوب و سیمان است که سرعت گیرایی و سخت شدن سیمان را کاهش داده و فرایند هیدراتاسیون سیمان را مختل می‌کند. هدف از این مطالعه استفاده از سیمان پوزولانی ویژه برای کاهش ناسازگاری بین چوب و سیمان ، بهبود عملکرد هیدراتاسیون سیمان و افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی چند سازه چوب – سیمان است.

مواد و روشها: خرده چوب‌های پسته (در محدوده ضخامتی ۰/۳ تا ۴ میلی‌متر و طول ۰/۳ تا ۱۶ میلی‌متر) و سیمان پرتلند ۱-۴۲۵ و سیمان پوزولانی ویژه به ترتیب از کارخانه نئوپان ۱۲ فروردین رفسنجان و سیمان کرمان تهیه شدند. عوامل متغیر شامل نسبت‌های مختلف (۵۰ به ۵۰، ۶۰ به ۴۰ و ۷۰ به ۳۰) سیمان پوزولانی ویژه و خرده چوب سرشاخه-های پسته و همچنین نسبت کلرید کلسیم (۳ و ۵ درصد) بودند. برای مقایسه تأثیر سیمان پرتلند پوزولانی ویژه با سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ یک تیمار شاهد از سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ و خرده چوب پسته به ترتیب با نسبت ۶۰ به ۴۰ و در یک سطح کلرید کلسیم (۵ درصد) ساخته شد. آزمون ویکات، آزمون‌های مکانیکی مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته و همچنین آزمون‌های فیزیکی جذب آب و واکشیدگی ضخامت ۲ و۲۴ ساعت برای بررسی خواص نمونه‌های ساخته شده مطابق آزمون‌های استاندارد بین المللی انجام گرفت.

نتایج: نتایج آزمون ویکات نشان داد که سیمان تیپ ۱ در مقایسه با سیمان پوزولانی ویژه سرعت گیرایی بالاتری دارد. همچنین با افزایش مقدار کلرید کلسیم و اضافه کردن خرده چوب به مخلوط چوب سیمان، زمان سخت شدن مخلوط چوب سیمان و عمق نفوذ سوزن ویکات کاهش می‌ابد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط مشابه (۶۰ درصد سیمان، ۴۰ درصد خرده چوب سرشاخه پسته و کلرید کلسیم ۵ درصد)، سیمان پرتلند پوزولانی ویژه در مقایسه با سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ عملکرد بهتری در زمینه تقویت خواص فیزیکی و مکانیکی تخته چوب سیمان دارد، به‌طوری که با استفاده از سیمان پرتلند پوزولانی ویژه مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته به ترتیب ۵۴ و ۱۱ درصد افزایش و جذب آب و واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۶، ۱۳، ۳۱ و ۲۶ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، نمونه‌های ساخته شده با ۶۰ درصد سیمان تیپ ۱-۴۲۵ و ۴۰ درصد خرده چوب، در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با سیمان پوزولانی ویژه و در شرایط مشابه مقدار جذب آب و واکشیدگی ضخامت بیشتری در مدت زمان غوطه‌وری ۲ و ۲۴ ساعت داشتند.

نتیجه‌گیری: مطابق با نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که چوب – سیمان ساخته شده با سیمان پوزولانی ویژه نسبت به سیمان پرتلند ۱-۴۲۵ دارای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مطلوب‌تری است و با داشتن وزنی سبک تر نسبت به بتن می‌تواند در سازه‌های پیش‌ساخته مثل دیوارهای غیر باربر، پارتیشن سازی، پوشش‌های داخلی ساختمان، درب‌های مقاوم به آتش و عایق صدا مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: تخته خرده چوب–سیمان، سیمان پوزولانی ویژه، خواص فیزیکی و مکانیکی، سرشاخه پسته.

مقدمه

در چند دهه اخیر، رشد چشمگیر جمعیت، تغییر شیوه‌های زندگی و افزایش تقاضا برای فرآورده‌های چوبی منجر به توسعه بسیاری از بخش‌های صنعتی، به ویژه صنعت چوب و مبلمان کشور شده است. این در حالی است که ایران در زمره کشورهایی با پوشش جنگلی کم قرار دارد. لذا حجم چوب برداشت‌شده از جنگل‌های ایران، نیازهای بخش صنعت چوب و مبلمان کشور را پاسخگو نیست. از این‌رو، در طول سالیان متمادی، استفاده از جنگل‌های مصنوعی دست کاشت و مواد لیگنوسلولزی مثل پسمانده‌های کشاورزی و ضایعات حاصل از هرس درختان باغی برای تولید فرآورده‌های چوبی و کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی مورد توجه قرارگرفته است. یکی از مهم‌ترین منابع لیگنوسلولزی که می‌تواند نقش مهمی در تولید منابع اولیه فراورده‌های صفحه‌ای چوبی فراهم نماید سرشاخه‌های حاصل از هرس سالیانه درختچه‌های پسته می‌باشد. بر اساس آمار سرشماری عمومی کشاورزی کل کشور در سال ۱۳۹۳، سطح کشت باغ پسته بیش از ۳۶۰ هزار هکتار است (بالغ بر ۳۹۰ میلیون اصله درخت). این مقدار سطح کشت، سالانه ۱۴۰ هزار تن سرشاخه تولید می‌کند. بیشتر این سرشاخه‌ها به علت بیماری‌زا بودن و جهت جلوگیری از افزایش آفات باغات پسته سوزانده می‌شوند. سوزاندن این منابع ارزشمند سلولزی خالی از عیب نیست و سبب آلودگی محیط‌زیست و از بین رفتن این منبع مهم تجدید پذیر می‌گردد [۱]. امروزه تلاش‌های قابل تحسینی در زمینه استفاده صنعتی از این منبع لیگنوسلولزی ارزان برای تولید زغال و فرآورده‌های مرکب چوبی مثل چوب پلاستیک و نئوپان انجام‌شده است [۲]. یکی از این فرآورده‌های چوبی که می‌توان برای تولید آن از سرشاخه‌های درختان پسته استفاده کرد، چندسازه چوب-سیمان است. چندسازه چوب – سیمان از ترکیب مواد سلولزی و یا لیگنوسلولزی با اتصال دهنده‌های معدنی مانند سیمان تولید می‌شود [۳]. چوب – سیمان دارای ویژگی‌های مطلوبی مانند چگالی کم، ثبات ابعادی بالا، مقاومت در برابر عوامل بیولوژیک و آتش، عایق مناسب گرما و صدا است. چوب-سیمان در مقایسه با فرآورده‌های مرکب چوبی با اتصال رزینی سنگین‌تر است اما به دلیل عدم انتشار گاز فرمالدئید امروزه در ردیف مصالح ساختمانی دوست دار محیط‌زیست قرارگرفته و با داشتن وزنی سبک تر نسبت به بتن در سازه‌های پیش‌ساخته چون دیوارهای غیر باربر در ساخت‌وسازهای ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. از دیگر مصارف صفحات فشرده چوب سیمان می‌توان به استفاده در پارتیشن سازی، پوشش‌های داخلی ساختمان، درب‌های مقاوم به آتش و عایق صدا اشاره کرد [۵-۳]. تولید صفحات فشرده چوب - سیمان به مواد اولیه آن شامل سیمان و مواد لیگنوسلولزی وابسته است و به دستگاه و تجهیزات پیشرفته نیاز نداشته و هزینه‌های تولید آن نسبت به سایر فرآورده‌های مرکب چوبی صرفه اقتصادی بیشتری دارد. از این رو خطوط تولید چندسازه چوب-سیمان در بسیاری از کشورهای جهان و در کارگاه‌های کوچک به منظور رفع نیاز بازارهای محلی گسترش یافته است [۶]. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بررسی امکان تولید و ارتقا کیفیت خواص فیزیکی و مکانیکی پانل‌های چوب سیمان صورت گرفته است. Gastro و همکاران (۲۰۱۸ و۲۰۱۹) سازگاری سیمان با گونه‌های چوب Eschweilera coriacea، Swartzia reanva poepp، Manilkara amazonica و Pouteria guianesisaubl را بررسی کردند. آنها بیان داشتند که این گونه‌های چوبی برای تولید چوب سیمان مناسب هستند زیرا هیچ اثر بازدارنده‌ای بر هیدراتاسیون سیمان از خود نشان ندادند [۸-۷]. Antiwi-Boasiako و همکاران (۲۰۱۸) امکان استفاده از گونه‌های چوبی استوایی Triplochiton sclerosylon، Entandrophragma cylindricuim و خاک اره Klainedosca gabonensis را برای تولید چوب سیمان بررسی کردند. آنها در این مطالعه گونه را بر اساس مطالعه ترکیبات شیمیایی، ترکیب و خواص فیزیکی و مکانیکی را به‌عنوان گونه مناسب جهت تولید چوب سیمان معرفی کردند [۹].

مشکل اصلی برای ساخت کامپوزیت‌های چوب-سیمان، ناسازگاری شیمیایی بین چوب و سیمان است که از گیرایی و سخت شدن سیمان جلوگیری می‌کند. این مواد ناسازگار کننده، عمدتاً شامل برخی قندها، بخشی از همی سلولزها و فرآورده‌های ناشی از تجزیه آنها می‌باشد.

تحقیقات مختلفی برای حذف عوامل بازدارنده و ناسازگار کننده و در ماتریس چوب سیمان انجام‌شده است. بخش عمده و تمرکز این تحقیقات بر روی اصلاح اجزای چوب و شکل‌های مختلف آن در ماتریس چوب سیمان است. Silva و همکاران (۲۰۲۰) و Kampragkou و همکاران (۲۰۲۴) به ترتیب تأثیر تیمار گرمایی الیاف اکالیپتوس و خرده چوب را بر خواص فیزیکی و مکانیکی تخته چوب سیمان بررسی کردند [۱۱-۱۰]. نتایج آنها نشان داد که تیمار گرمایی می‌تواند عملکرد تخته چوب سیمان را افزایش دهد. همچنین Li و همکاران (۲۰۲۴) بهینه سازی خواص مکانیکی و مقاومت در برابر آب کامپوزیت‌های سیمان خاک اره-اکسید کلرید منیزیم را بررسی کردند [۱۲]. Quirog و همکاران (۲۰۱۶) هیدرولیز قلیایی را به‌عنوان مؤثرترین تیمار برای سرکوب و حذف مواد بازدارنده خرده چوب بیان کردند [۱۳]. Liu و همکاران (۲۰۲۲) مطالعه‌ای جهت اصلاح چیپس چوب و کاربرد آن در ساخت چوب سیمان مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مطالعه برای اصلاح چیپس چوب از روش پخت قلیایی با غلظت ۲ تا ۸ درصد و عمل جفت کننده سیلانی (۱ تا ۵ درصد) استفاده کردند. علاوه بر این، آزمایش‌های XRD، SEM و FT-IR را برای بررسی بیشتر و کشف مکانیسم عمل تراشه‌های چوب اصلاح‌شده در ماتریس سیمان را انجام دادند. نتایج نشان داد که عامل پخت قلیایی می‌تواند به‌طور مؤثر اجزای بی‌شکل مانند همی سلولز و لیگنین را از تراشه‌های چوب حذف کند، بلورینگی و محتوای نسبی سلولز را بهبود بخشد و زبری سطح خرده‌های چوب را افزایش دهد. عامل جفت کننده سیلان نیز توانست با تراشه‌های چوب پیوند شیمیایی برقرار کند تا خواص سطحی بین تراشه‌های چوب و ماتریس سیمان را بهبود بخشد [۱۴]. Liu و همکاران (۲۰۲۳) رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با تراشه‌های چوب اصلاح‌شده را بررسی و با کامپوزیت‌های شاهد مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با تراشه‌های چوب اصلاح‌شده کاهش می‌یابد، در حالی که مقاومت خمشی، چقرمگی خمشی و انرژی شکست نسبت به نمونه‌های شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد [۱۵]. همه گونه‌های چوبی پیوند خوبی با سیمان نشان نمی‌دهند زیرا هر گونه ساختار و ترکیب شیمیایی متفاوتی دارد. به طوری که نوع چوب، رویشگاه و حتی سن گونه چوبی می‌تواند در کیفیت اتصالات چوب- سیمان تفاوت ایجاد کند [۱۶]. به همین دلیل است که در طول سال‌های متمادی تحقیقات زیادی در مورد این موضوع با گونه‌های مختلف چوب، انواع سیمان و مواد افزودنی، برای تولید انواع کامپوزیت‌های سیمان-چوب برای کاربردهای مختلف انجام‌شده است. در فرایند ساخت تخته خرده چوب سیمان با سیمان پرتلند، مواد قندی و استخراجی موجود در مواد لیگنوسلولزی در فرایند هیدراتاسیون سیمان اخلال ایجاد می‌کنند و مانع پیشرفت فرایند هیدراتاسیون سیمان می‌شود. یک راهکار علمی و مورد استفاده برای غلبه بر موانعی که مواد قندی و استخراجی موجود در مواد لیگنوسلولزی در فرایند هیدراتاسیون سیمان اخلال ایجاد می‌کنند، استفاده از نمک‌های فلزی مثل کلرید کلسیم و کلرید سدیم است. ماده افزودنی کلرید کلسیم باعث تأخیر تشکیل یک محیط قلیایی در پیرامون ذرات لیگنوسلولزی می‌گردد که این تأخیر باعث تبدیل مواد قندی به اسید ساخارین شده که سبب درگیر شدن و افزایش گیرایی چوب و سیمان می‌شود [۱۷-۱۸]. راهکار دیگر استفاده از سیمان‌های پوزولانی و یا پوزولانی ویژه است. سیمان‌های پوزولانی و پوزولانی ویژه علاوه بر داشتن ترکیبات معدنی سیمان پرتلند، حاوی ترکیبات سیلیسی یا سیلیس آلومینیمی هستند که از خاکسترهای آتشفشانی، سوختن مواد معدنی از قبیل زغال‌سنگ و خاکستر حاصل از پسماندهای لیگنوسلولزی مانند ساقه برنج، پوسته برنج و ساقه باگاس نیشکر به دست می‌آیند (درصد مواد پوزولانی ۱۰ تا ۲۵۰ درصد وزن خشک کلینکر سیمان پرتلند برحسب نوع سیمان پوزولانی می‌باشد). سیلیس موجود در سیمان‌های پوزولانی با هیدروکسید کلسیم آزاد شده در فرآیند هیدراتاسیون سیمان، واکنش داده و با قلیایی کردن محیط موجب بهبود واکنش هیدراتاسیون سیمان در حضور الیاف سلولزی و یا لیگنوسلولزی شده و درنهایت سبب افزایش گیرایی سیمان می‌شود [۱۹]. از دیگر ویژگی سیمان پوزولانی ویژه می‌توان به آب‌گریز بودن مواد سیلیکاتی در ساختار مواد پوزولانی ویژه اشاره کرد

که موجب کاهش جذب آب و واکشیدگی ضخامت و بهبود پیوند در کامپوزیت می‌شود. از این رو هدف از این مطالعه استفاده از سیمان پوزولانی ویژه در ساخت تخته چوب سیمان به همراه خرده چوب سرشاخه‌های پسته و بررسی تأثیر آن بر خواص فیزیکی و مکانیکی پانل‌های ساخته شده می‌باشد. انتظار می‌رود که محصول تولیدی نهایی دارای ویژگی‌هایی مطلوبی برای استفاده در محیط‌های بیرونی ساختمان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

خرده چوب‌های پسته مورد استفاده در این تحقیق به صورت آماده از کارخانه نئوپان ۱۲ فروردین رفسنجان تهیه شدند. ذرات خرده چوب در محدوده ضخامتی ۰/۳ تا ۴ میلی‌متر و طول ۰/۳ تا ۱۶ میلی‌متر بودند. ذرات خرده چوب مورد نظر پس از خشک شدن در محدوده رطوبتی ۳ درصد و یکسان سازی رطوبت در ساخت تخته خرده چوب سیمان مورد استفاده قرار گرفتند. دو نوع سیمان پرتلند پوزولانی ویژه، سیمان پرتلند تیپ ۱- ۴۲۵ و کلرید کلسیم با نام تجاری (Calcium Chloride)با فرمول شیمیایی ($CaCl_2$) به‌عنوان کاتالیزور و تسریع کننده واکنش شیمیایی در هیدراتاسیون سیمان با درجه خلوص ۹۷ درصد به ترتیب از کارخانه سیمان ممتازان کرمان و صنایع شیمیایی کیان کاوه تهیه شدند.

در این تحقیق عوامل متغیر در ساخت چوب- سیمان خرده چوب سرشاخه‌های درخت پسته در سه سطح ۳۰،۴۰،۵۰ درصد (نسبت به جرم سیمان پوزولانی ویژه) و ماده افزودنی کلرید کلسیم ۳ و ۵ درصد (جرم سیمان پوزولانی ویژه) می‌باشند. یک تیمار شاهد با نسبت ۴۰ به ۶۰ (خرده چوب به سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵) و ماده افزودنی کلرید کلسیم به میزان ۵ وزن خشک سیمان برای مقایسه تأثیر سیمان پوزولانی ویژه و سیمان پرتلند بر خواص فیزیکی و مکانیکی تخته خرده چوب سیمان در نظر گرفته شد. اندازه ذرات سرشاخه پسته (محدوده ضخامتی ۰/۳ تا ۴ و طول ۰/۳ تا ۱۶ میلی‌متر)، دانسیته تخته نهایی (1 kg/m3)، ضخامت تخته‌ها (۱۵ میلی‌متر)، فشار پرس (۳۰kg/cm2) و میزان آب مصرفی برای کلیه نمونه‌ها) ۴۰ درصد جرم خشک سیمان ثابت بودند.

آماده سازی مواد و ساخت تخته خرده چوب – سیمان

پس از آماده سازی مواد، دو نوع سیمان پرتلند پوزولانی ویژه و سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵، خرده چوب پسته، کلرید کلسیم و آب مصرفی توزین و برای ساخت کیک تخته خرده چوب که درصد اختلاط مواد بر اساس ابعاد تخته ۱۵×۳۷۰×۳۷۰ میلی‌متر (به ترتیب طول، پهنا و ضخامت)، دانسیته (۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و نوع تیمار در مطابق جدول ۱ آماده و باهم ترکیب شدند.

جدول ۱- اختلاط مواد برای ساخت تخته خرده چوب سیمان

تیمار	خرده چوب (g)		سیمان (g)	آب (g)	کلرید کلسیم (g)
	درشت	ریز			
۵۰ به ۵۰ پوزولانی ویژه و کلرید ۵٪	۳۴۲/۲۵	۶۸۴/۵	۱۰۲۶/۷۵	۴۱۰/۷	۵۱/۳۳
۵۰ به ۵۰ پوزولانی ویژه و کلرید ۳٪	۳۴۲/۲۵	۶۸۴/۵	۱۰۲۶/۷۵	۴۱۰/۷	۳۰/۸۰
۶۰ به ۴۰ پوزولانی ویژه و کلرید ۵٪	۲۷۳/۸	۵۴۷/۶	۱۲۳۲/۱	۴۹۲/۸۴	۶۱/۶۰
۶۰ به ۴۰ پوزولانی ویژه و کلرید ۳٪	۲۷۳/۸	۵۴۷/۶	۱۲۳۲/۱	۴۹۲/۸۴	۳۶/۹۶
۷۰ به ۳۰ پوزولانی ویژه و کلرید ۵٪	۲۰۵/۳۵	۴۱۰/۷	۱۴۳۷/۴۵	۵۷۴/۹۸	۷۱/۸۷
۷۰ به ۳۰ پوزولانی ویژه و کلرید ۳٪	۲۰۵/۳۵	۴۱۰/۷	۱۴۳۷/۴۵	۵۷۴/۹۸	۴۳/۱۲
۶۰ به ۴۰ تیپ ۱ و کلرید ۵٪	۲۷۳/۸	۵۴۷/۶	۱۲۳۲	۴۹۲/۸۴	۶۱/۶

ساخت تخته خرده چوب – سیمان

بعد از توزین و آماده سازی مواد بر اساس ابعاد و دانسیته تخته طبق جدول ۱ ابتدا خرده چوب‌ها در یک ظرف ریخته شدند و کلرید کلسیم به آب توزین شده افزوده و هم زده شد تا کلرید کلسیم کاملاً در آب حل شود در ادامه آب به خرده چوب‌ها افزوده به مدت ۵ دقیقه

باهم زن برقی مخلوط شد و در نهایت سیمان اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه باهم زن مخلوط تا ترکیب خرده چوب با سیمان کاملاً به صورت یکنواخت شود. شکل ۱ اشکال الف-ب-ج مراحل ترکیب مواد تخته چوب- سیمان هم زدن خرده چوب‌ها و توزین آب و کلرید کلسیم و ترکیب آن‌ها با سیمان را نشان می‌دهد.

الف: هم زدن خرده چوب‌ها ب: توزین آب و کلرید کلسیم ج: مخلوط سیمان، خرده چوب و کلرید کلسیم

شکل ۱- اشکال الف – ب- ج مراحل ترکیب مواد تخته چوب سیمان

در مرحله بعد مخلوط چوب - سیمان در قالبی از جنس MDF به ابعاد ۴۸×۳۷۰×۳۷۰ میلی‌متر که داخل آن با نایلکس پوشانده شده تا مانع از نفوذ رطوبت به قالب شود به صورت یکنواخت در تمام سطح قالب ریخته شد و با دست فشرده گردید تا ضخامت کیک تخته چوب سیمان در تمام سطح قالب ۴۸ میلی‌متر شود. در نهایت در قالب با شابلون ۱۵ میلی‌متر روی کیک خرده چوب سیمان گذاشته شد و زیر پرس صنعتی با قطر پیستون ۱۵ میلی‌متر با فشارثابت ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت و فرایند پرس انجام شد. تا پرس کامل شود. در شکل ۲ مراحل تشکیل کیک و پرس تخته چوب –سیمان نشان داده شده است.

بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌های چوب –سیمان از قالب بیرون آورده شدند. تخته‌ها بعد از ساخت به منظور متعادل سازی رطوبت و کاهش تنش‌های داخلی به مدت ۲۸ روز در شرایط استاندارد دمایی ۲ ±۲۰ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی۵ ± ۶۵ درصد قرار داده شدند تا مقاومت نهایی حاصل شود. سپس تخته‌ها در شرایط دمایی ثابت قرار گرفتند تا کاملاً و به‌طور یکنواخت خشک شوند.

شکل ۲. الف: مراحل تشکیل کیک و پرس تخته الف: کیک خرده چوب سیمان در قالب ب: قالب قرار گرفته زیر پرس سرد

اندازه بری تخته چوب – سیمان

بعد از ۲۸ روز قرار گرفتن نمونه‌های ساخته شده در شرایط کلیما و رسیدن تخته‌ها به مقاومت نهایی، تخته‌ها برای برش نمونه‌های آزمایشگاهی برای آزمون خمش و مدول الاستیسیته بر اساس استاندارد EN 310به ابعاد ۱۵×۵۰×۳۵۰ میلی‌متر و برای آزمون جذب آب و واکشیدگی ضخامت بر اساس استاندارد EN 317 به ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر با دستگاه پانل بر اندازه بری شدند (شکل ۵-۳).

آزمون‌ها

آزمون ویکات

هدف از این آزمایش تعیین زمان گیرایی سیمان می‌باشد. این آزمایش به وسیله دستگاه ویکات و مطابق (استاندارد ۳۹۲ ایران) انجام شد. برای تعیین زمان گیرایی سیمان سوزن ویکات را هر ۱۵ دقیقه یکبار بافاصله ۵ میلی‌متر از جای قبلی رها کرده و میزان نفوذ میله را به میلی‌متر در جدول ثبت می‌شود تا میزان نفوذ سوزن برای تعیین زمان گیرایی سیمان مشخص شود این عمل تا زمانی انجام می‌شود که دیگر سوزن قابلیت نفوذ به داخل خمیر سیمان را نداشته باشد. اولین لحظه تغییر در میزان نفوذ سوزن داخل سیمان به‌عنوان شروع گیرایی و لحظه پایان نفوذ سوزن به داخل سیمان به‌عنوان پایان گیرایی ثبت می‌شود.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌ها

آزمون خمش و مدول الاستیسیته

برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) از دستگاه آزمونی Testing (HOUN SFIELD H25KS) آزمایشگاه صنایع چوب و کاغذ دانشگاه زابل برابر استاندارد EN310 استفاده شد (شکل۳).

شکل ۳- آزمون خمش با دستگاه تست خمش استاتیک

مدول خمشی با نمونه‌هایی به طول ۲۰ برابر ضخامت به علاوه ۵۰ میلی‌متر به ابعاد ۱۵×۵۰×۳۵۰ میلی‌متر با سه تکرار از هر تخته با نوع بارگذاری سه نقطه‌ای بافاصله تکیه گاه ۲۰ برابر ضخامت تخته‌ها به فاصله ۳۰۰ میلی‌متر در وسط تخته با سرعت بارگذاری ۴/۰۶ میلی‌متر بر دقیقه اعمال گردید. برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی نمونه‌ها، ابتدا بر اساس استاندارد EN317به ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر برش داده شدند.

طرح آماری

در این مطالعه به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها و مقایسه اختلاف آماری میان میانگین‌ها، نرم‌افزار SPSS-24 استفاده شد که در صورت معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد، از آزمون دانکن برای گروه‌بندی میانگین‌ها استفاده شد.

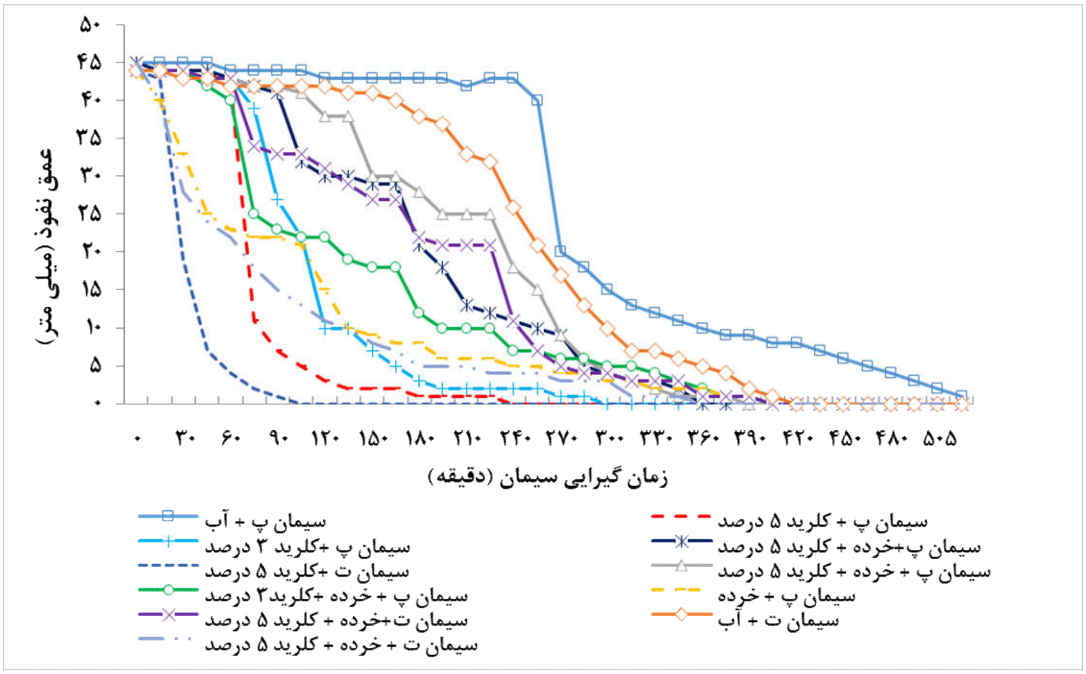
بحث و نتایج

آزمون ویکات

در این آزمون تأثیر ماده افزودنی کلرید کلسیم بر سرعت گیرایی ترکیب خرده چوب پسته و دو نوع سیمان پوزولانی ویژه و سیمان تیپ ۱-۴۲۵ در تیمارهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفت، نتایج بررسی در شکل ۴ بیان‌شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، زمان سخت شدن سیمان پوزولانی ویژه بدون مواد افزودنی کلرید کلسیم حدود ۵۳۵ دقیقه می‌باشد. با افزایش کلرید کلسیم سرعت گیرایی سیمان پوزولانی ویژه افزایش می‌یابد، به طوری که با اضافه کردن ۳ و ۵ درصد کلرید کلسیم، زمان سخت شدن سیمان به ترتیب به ۳۰۰ و ۲۴۰ دقیقه کاهش پیدا می‌کند. با افزودن خرده چوب پسته به سیمان پوزولانی ویژه بدون کلرید کلسیم برخلاف فرض مورد انتظار، سرعت گیرایی مخلوط سیمان پوزولانی ویژه و خرده چوب افزایش یافت و زمان گیرایی آن را به ۳۷۵ دقیقه کاهش داد. این اتفاق را می‌توان این‌طور توضیح داد که خرده چوب می‌تواند به‌عنوان پرکننده عمل کرده و همچنین به سرعت آب سیمان را جذب کرده و مانع نفوذ سوزن به خمیر شده در نتیجه عمق نفوذ سوزن ویکات را کاهش دهد و این در حالی است که هیدراتاسیون سیمان به صورت ناقص انجام می‌شود.

همچنین نتایج شکل ۴ بیانگر این است که با افزودن خرده چوب پسته به سیمان پوزولانی ویژه همراه با کلرید کلسیم ۵ درصد زمان سخت شدن چوب-سیمان ۳۹۰ دقیقه و با افزودن ۳ درصد کلرید کلسیم زمان سخت شدن به ۴۲۰ دقیقه افزایش می‌یابد. این اتفاق بیانگر این است که افزایش کلرید کلسیم می‌تواند به خوبی بر عوامل محدود کننده و کاهش‌دهنده گیرایی و هیدراتاسیون سیمان موجود در خرده چوب پسته غلبه کند و سرعت هیدراتاسیون و گیرایی سیمان را افزایش دهد.

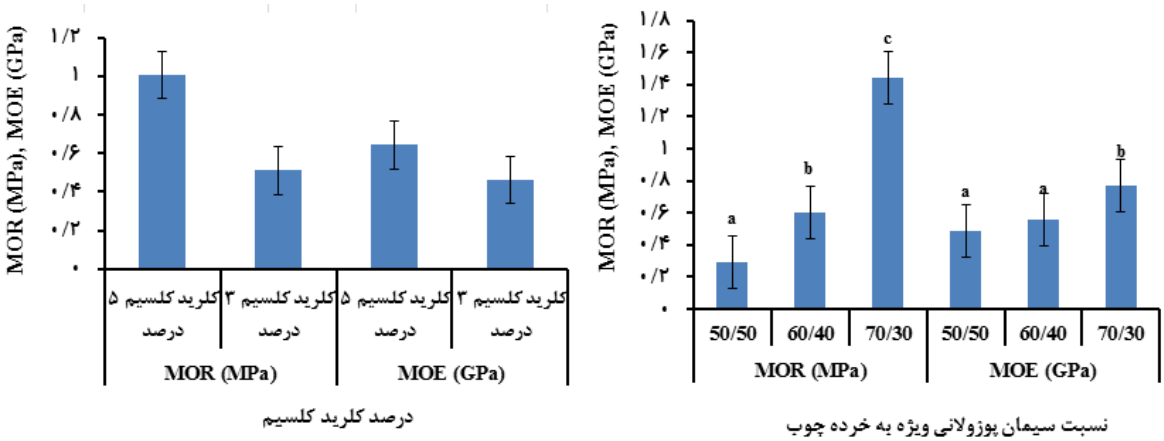
در نتایج به دست آمده مطابق شکل ۴، سیمان تیپ ۱ در مقایسه با سیمان پوزولانی ویژه سرعت گیرایی بالاتری را نشان می‌دهد. در تیمار سیمان تیپ ۱ با آب و بدون افزودن کلرید کلسیم، زمان سخت شدن سیمان تیپ۱ حدود ۴۲۰ است و در مقایسه با سیمان پوزولانی ویژه و در شرایط مشابه ۱۱۵ دقیقه کاهش در زمان گیرایی را نشان می‌دهد. با افزودن ۵ درصد کلرید کلسیم به سیمان تیپ ۱ گیرایی نهایی آن به ۱۵۰ دقیقه می‌رسد. به‌طورکلی سیمان تیپ ۱ سرعت هیدراتاسیون بالای دارد و زمان واکنش گرمای زیادی از خود تولید می‌کند. افزودن کلرید کلسیم به سیمان تیپ ۱، باعث افزایش بیش از حد سرعت هیدراتاسیون و دمای سیمان شده و سرعت و گرمای بیش از حد در گیرایی سیمان باعث منقبض شدن و ایجاد تنش و ترک‌هایی در تخته خرده چوب سیمان شده و کاهش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را به دنبال خواهد داشت. نتایج آزمون خمش و مدول الاستیسیته نمونه‌های شاهد حاکی بر درستی این نتیجه است. در فرایند تولید تخته خرده چوب سیمان، یکسری از ترکیبات مواد لیگنوسلولزی مثل همی سلولزها، لیگنین و مواد استخراجی از عوامل محدود کننده و کاهش‌دهنده گیرایی و هیدراتاسیون سیمان به‌حساب می‌آیند که برای غلبه بر این مشکل و افزایش سرعت هیدراتاسیون سیمان از تسریع کننده‌هایی مثل کلرید کلسیم استفاده می‌شود. کلرید کلسیم از انتشار مواد بازدارنده گیرایی سیمان (همی سلولزها و مواد استخراجی) جلوگیری می‌کند که در نتیجه این امر، هیدراتاسیون سیمان و تسریع گیرایی سیمان بهبود می‌یابد و در نهایت سبب بهنود فرایند هیدراتاسیون سیمان و افرایش مقاومت محصول نهایی می‌شود. بر اساس پژوهش انجام‌شده توسط Quirog و همکاران (۲۰۱۶) و Liu و همکاران (۲۰۲۲)، با افزودن مواد شیمیایی تسریع کننده به مخلوط آب، سیمان و خرده چوب مشاهده کردند که تسریع کننده‌ها باعث افزایش سرعت هیدراتاسیون سیمان شده و خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌های ساخته شده از مواد لیگنوسلولزی را بهبود می‌بخشند [۱۴-۱۳].



شکل ۴ – آزمون ویکات: مقایسه عمق نفوذ تیمارهای مختلف (پ: سیمان پوزولانی ویژه و ت: سیمان تیپ ۱-۴۲۵)

مقاومت خمشی تخته خرده چوب- سیمان

شکل ۵ تأثیر اثر مستقل کلرید کلسیم (A) و نسبت سیمان پوزولانی ویژه به خرده چوب (B) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش نسبت سیمان پوزولانی ویژه و همچنین درصد کلرید کلسیم مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته تخته خرده چوب-سیمان افزایش می‌یابد.



شکل ۵ - تأثیر اثر مستقل کلرید کلسیم (A) و نسبت سیمان پوزولانی ویژه به خرده چوب (B) بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته تخته خرده چوب-سیمان

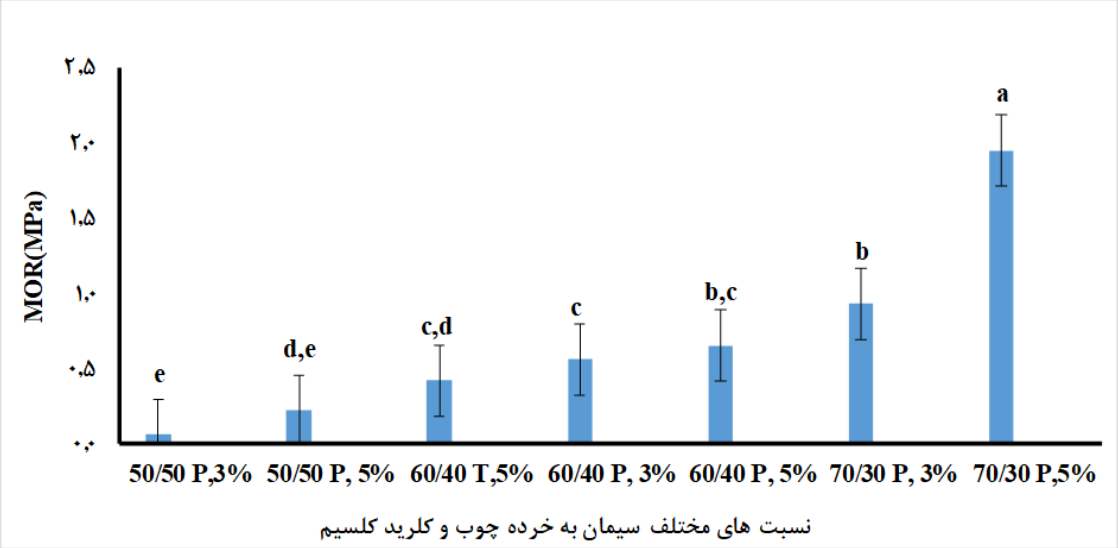
تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر عوامل متغیر بر خواص مکانیکی پانل‌های چوب سیمان در جدول ۲ نشان داده شده است. همان طور که در این جدول مشخص است اثر عوامل متغیر بر خواص مکانیکی پانل‌های چوب سیمان معنی‌دار است. مطابق با شکل ۶ با افزایش مقدار سیمان پوزولانی ویژه از ۵۰ به ۷۰ درصد و کلرید کلسیم از ۳ به

۵ درصد در ساخت تخته‌های آزمونی، مقاومت خمشی نیز افزایش می‌یابد و بیشترین مقاومت خمشی در تخته‌های ساخته شده با ۷۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و ۵ درصد کلرید کلسیم به میزان ۱/۹۵ مگاپاسکال و کمترین مقاومت خمشی به میزان ۰/۰۶ مگاپاسکال در تخته‌های ساخته شده با ۵۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و ۳ درصد کلرید کلسیم مشاهده شد.

جدول ۲- تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر عوامل متغیر بر خواص مکانیکی پانل‌های چوب سیمان

خواص مکانیکی	گروه‌ها	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	معنی‌داری (Sig)
مقاومت خمشی	بین گروه‌ها	۶	۷/۱۰۷	۱/۱۸۵	۳۵/۳۷۹	**۰/۰۰۰
	درون گروه‌ها	۱۴	۰/۴۶۹	۰/۰۳۳		
	مجموع	۲۰	۷/۵۷۶			
مدول الاستیسیته	بین گروه‌ها	۶	۲۷۹۸۸۱۸/۸۵۵	۴۶۶۴۶۹/۸۰۹	۵/۴۱۴	**۰/۰۰۴
	درون گروه‌ها	۱۴	۱۲۰۶۱۷۲/۷۶۸	۸۶۱۵۵/۱۹۸		
	مجموع	۲۰	۴۰۰۴۹۹۱/۶۲۳			

تأثیر کاهش نسبت سیمان بر کاهش مقاومت خمشی تخته خرده چوب با توجه به منابع موجود چنین بیان می‌شود با افزایش نسبت خرده چوب، میزان هم کشیدگی تخته‌ها هنگام خشک شدن بیشتر شده و تمرکز تنش در سطح مشترک بین سطح چوب و سیمان افزایش می‌یابد و منجر به ایجاد و رشد ترک‌های مویی در تخته‌ها می‌شود. در نتیجه مقاومت خمشی تخته‌ها کاهش می‌یابد [۱۵,۱۷, ۱۳].



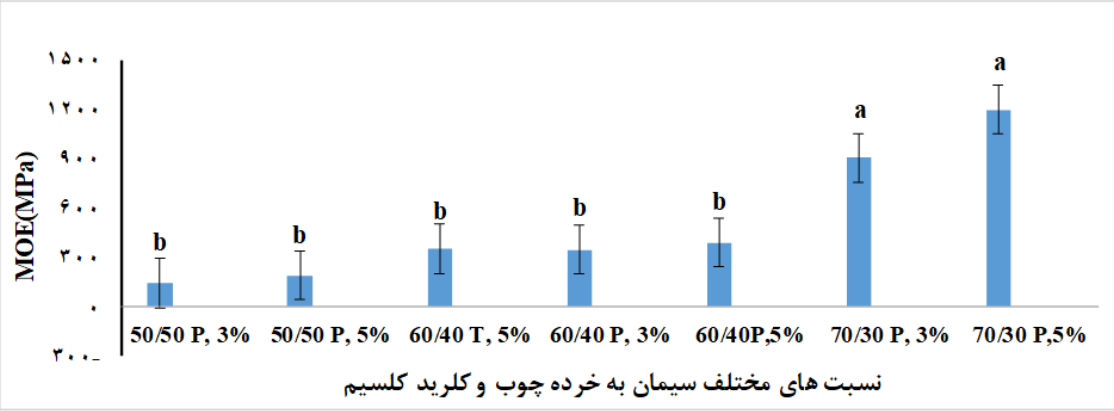
شکل۶ - تأثیر متقابل سیمان پوزولانی ویژه و کلرید کلسیم بر مقاومت خمشی تیمارهای مختلف آزمونی (P = سیمان پوزولانی ویژه و T = سیمان پرتلند تیپ ۱- ۴۲۵)

تأثیر مثبت افزایش درصد کلرید کلسیم بر مقاومت خمشی نمونه‌های چوب سیمان را می‌توان به این نسبت داد که ترکیبات معدنی دارای سیلیکون، منیزیم، سدیم و کلسیم می‌توانند به دیواره سلولی ذرات چوب نفوذ نموده و بر روی برهمکنش و چسبندگی ذرات چوب با سیمان اثر مثبت گذاشته و یا با تغییر سفتی اجزای چوبی، مدول الاستیسیته ظاهری محصول را بهبود دهند [۱۳-۱۷]. نمونه‌های شاهد (۶۰ درصد سیمان تیپ ۱ و کلرید ۵

درصد) نسبت به سیمان پوزولانی ویژه در شرایط مشابه مقاومت خمشی پایین‌تری را نشان دادند. دلیل این امر را با توجه به نتایج آزمون ویکات می‌توان این‌چنین توضیح داد که با افزودن ۵ درصد کلرید کلسیم به سیمان تیپ ۱ گیرایی نهایی سیمان به ۱۵۰ دقیقه می‌رسد. در نتیجه کلرید کلسیم افزوده شده به سیمان تیپ ۱ باعث افزایش بیش از حد سرعت هیدراتاسیون و دمای سیمان شده و سرعت و گرمای بیش از حد در گیرایی سیمان باعث منقبض شدن و ایجاد تنش و ترک‌هایی در تخته خرده چوب سیمان شده و کاهش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را به دنبال داشته است. نتایج آزمون خمش و مدول نمونه‌های شاهد حاکی بر درستی این نتیجه است [۱۷-۱۸] در تحقیقات خود به نتایج مشابهی دست یافتند.

مدول الاستیسیته تخته خرده چوب سیمان

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است با افزایش درصد سیمان پوزولانی ویژه به‌عنوان اتصال دهنده معدنی از ۵۰ درصد به ۷۰ درصد و کلرید کلسیم به‌عنوان تسریع کننده از ۳ درصد به ۵ درصد، مدول الاستیسیته نیز افزایش می‌یابد و بیشترین مدول الاستیسته به مقدار ۱۱۹۵/۲۹ مگاپاسکال مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۷۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و ۵ درصد کلرید کلسیم و کمترین مدول الاستیسیته مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و ۳ درصد کلرید کلسیم به میزان ۱۴۰/۲۹ مگاپاسکال می‌باشد. Lisboa و همکاران (۲۰۲۰) و Setter و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافتند که با افزایش میزان مواد لیگنوسلولزی و در نتیجه کاهش نسبت سیمان در کیک تخته خرده چوب، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد [۵ و۳]. این محققین علت را این گونه بیان کردند که با افزایش مواد لیگنوسلولزی نسبت به سیمان، الگوی هیدراتاسیون سیمان بیشتر دچار اختلال شده و درنتیجه اتصالات ضعیفی در ماتریس چوب و سیمان ایجاد می‌شود که موجب کاهش مقاومت‌های مکانیکی فرآورده می‌گردد. اثر مثبت تسریع کننده کلرید کلسیم بر بهبود مدول الاستیسیته چوب سیمان با یافته‌های Liu و همکاران (۲۰۲۲ و ۲۰۲۳) مطابقت دارد [۱۴ و ۱۵]. مقایسه نمونه‌های شاهد (۶۰ درصد سیمان تیپ ۱ و کلرید ۵ درصد) نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سیمان پوزولانی ویژه در شرایط مشابه، مقدار مدول الاستیسته کمتری را نشان دادند. به‌طورکلی فرایند هیدراتاسیون سیمان یک فرایند گرمازا است و با تسریع این فرایند (اضافه شدن کاتالیزور) سرعت واکنش افزایش می‌یابد و به طبع آن گرمای بیشتری تولید می‌شود این اتفاق، باعث اختلال در فرایند هیدراتاسیون سیمان و گیرایی ناقص آن می‌شود که نهایتاً افت خواص محصول نهایی را به همراه دارد. در سیمان‌های پوزولانی و پوزولانی ویژه، به علت وجود ترکیبات سیلیسی در آنها، سرعت انجام واکنش کاهش می‌یابد و همچنین گرمای واکنش کمتری تولید می‌شود در نتیجه درجه پیشرفت و تکمیل واکنش افزایش می‌یابد و فرایند هیدراتاسیون سیمان به‌صورت کامل‌تری انجام می‌شود که این می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی محصول نهایی کمک کند. این نتیجه با نتایج تحقیق محمد کاظمی و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی اثر نانو سیلیس و نوع ماده لیگنوسلولزی بر خواص فیزیکی و مکانیکی پانل‌های چوب سیمان مطابقت دارد [۱۹].



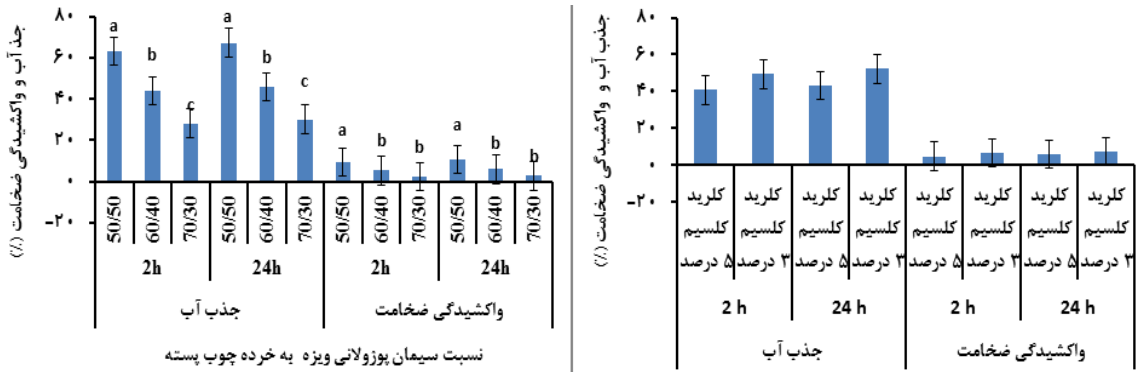
شکل ۷ - تأثیر متقابل سیمان پوزولانی ویژه و کلرید کلسیم بر مدول الاستیسیته تیمارهای مختلف آزمونی (P = سیمان پوزولانی ویژه و T = سیمان پرتلند تیپ ۱- ۴۲۵)

جذب آب تخته خرده چوب-سیمان

نتایج بررسی تحلیل واریانس اثر سیمان پوزولانی ویژه و تقویت کننده کلرید کلسیم جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت سطح اعتماد ۹۵ درصد در جدول ۳ ارائه‌شده است. با توجه به نتایج جدول ۳ اثر عوامل متغیر بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت معنی‌دار است. شکل ۸ اثر مستقل نسبت سیمان پوزولانی ویژه به خرده چوب پسته و درصد کلرید کلسیم بر میزان جذب آب تخته خرده چوب-سیمان را نشان می‌دهد.

جدول ۳- تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر عوامل متغیر بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت پانل‌های چوب سیمان

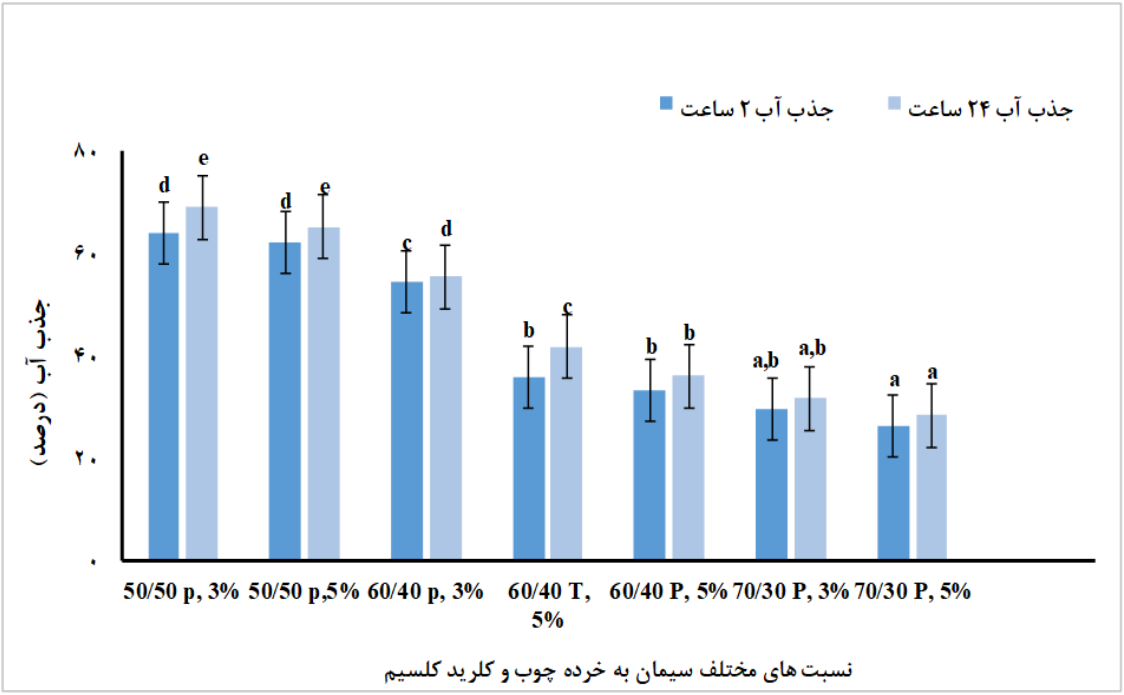
خواص فیزیکی	گروه‌ها	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	معنی‌دار (Sig)
جذب آب ۲ ساعت	بین گروه‌ها	۶	۴۶۰۸/۰۸۲	۷۶۸/۰۱۴	۶۱/۷۴۳	**۰/۰۰۰
	درون گروه‌ها	۱۴	۱۷۴/۱۴۴	۱۲/۴۳۹		
	مجموع	۲۰	۴۷۸/۲۲۶			
جذب آب ۲۴ ساعت	بین گروه‌ها	۶	۴۸۶۰/۰۹۸	۸۱۰/۰۱۵	۹۳/۵۸۵	**۰/۰۰۰
	درون گروه‌ها	۱۴	۱۲۱/۱۷۶	۸/۶۵۵		
	مجموع	۲۰	۴۹۸۱/۲۲۶			



شکل ۸- اثر مستقل نسبت سیمان پوزولانی ویژه به خرده چوب پسته و درصد کلرید کلسیم بر میزان جذب آب و واکشیدگی ضخامت تخته خرده چوب-سیمان

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است با افزایش نسبت سیمان پوزولانی ویژه همچنین درصد کلرید کلسیم جذب آب و واکشیدگی ضخامت تخته خرده چوب-سیمان کاهش می‌یابد. در شکل ۹ (اثر متقابل درصدهای مختلف سیمان پوزولانی ویژه و کلرید کلسیم بر جذب آب نمونه-ها) نشان داده شده است بیشترین مقدار جذب آب بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب (به ترتیب به مقدار ۶۴/۱۱ و ۶۹/۰۹ درصد) مربوط به تخته‌هایی است که از ترکیب ۵۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و خرده چوب و ۳ درصد کلرید کلسیم حاصل شده‌اند. همچنین در شکل ۹ مشخص است که با افزایش درصد سیمان پوزولانی ویژه در ترکیب سیمان و خرده چوب، مقدار جذب آب کاهش می‌یابد. تخته‌های ساخته شده با نسبت ۷۰ به ۳۰ درصد (سیمان پوزولانی ویژه به خرده چوب) و ۵ درصد کلرید کلسیم کمترین مقدار جذب آب به مقدار ۲۶/۴۳ برای ۲ ساعت و ۲۸/۳۹ درصد برای ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب مشاهده شد. مطابق با نتایج نمونه‌های شاهد (۶۰ درصد سیمان تیپ ۴۲۵-۱ و ۴۰ درصد خرده چوب)، در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با سیمان پوزولانی ویژه و در شرایط مشابه مقدار جذب آب بیشتری در ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب نشان دادند.

دلیل کاهش جذب آب در نمونه‌های تخته خرده چوب-سیمان با افزایش نسبت سیمان و مقدار کلرید کلسیم را می‌توان استنباط نمود که با افزایش نسبت سیمان به خرده چوب پسته، اولا یک شبکه قوی و کار آمد در اثر ایجاد اتصال بین ذرات سیمان و سطح ذرات خرده چوب ایجاد می‌شود که به استحکام و بهبود خواص محصول کمک می‌کند و دوما، با افزایش نسبت سیمان در ملات خرده‌چوب – سیمان، میزان تخلخل و خلل و فرخ در تخته خرده چوب سیمان کاهش پیدا می-کند که این مقدار کاهش خلل و فرج و پرشدگی آنها با ذرات سیمان، به کاهش جذب آب نمونه‌ها کمک شایانی می‌کند. همچنین با افزایش اثر ماده افزودنی کلرید کلسیم، فرایند هیدراتاسیون سیمان بهتر تکامل پیدا می-کند که هیدراتاسیون خود به‌عنوان مانعی در برابر جذب آب و واکشیدگی ضخامت چوب سیمان عمل می‌کند. Silva و همکاران (۲۰۲۰) و Li و همکاران (۲۰۲۴) به ترتیب با بررسی اثر ماده افزودنی کلرید کلسیم و کلرید منیزیم به نتایج مشابهی دست یافتند [۱۳ و ۱۱].



شکل ۹ - اثر متقابل درصدهای مختلف سیمان پوزولانی ویژه و کلرید کلسیم بر جذب آب نمونه‌ها، پس از ۲ و۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب (P = سیمان پوزولانی ویژه و T = سیمان پرتلند تیپ ۱- ۴۲۵)

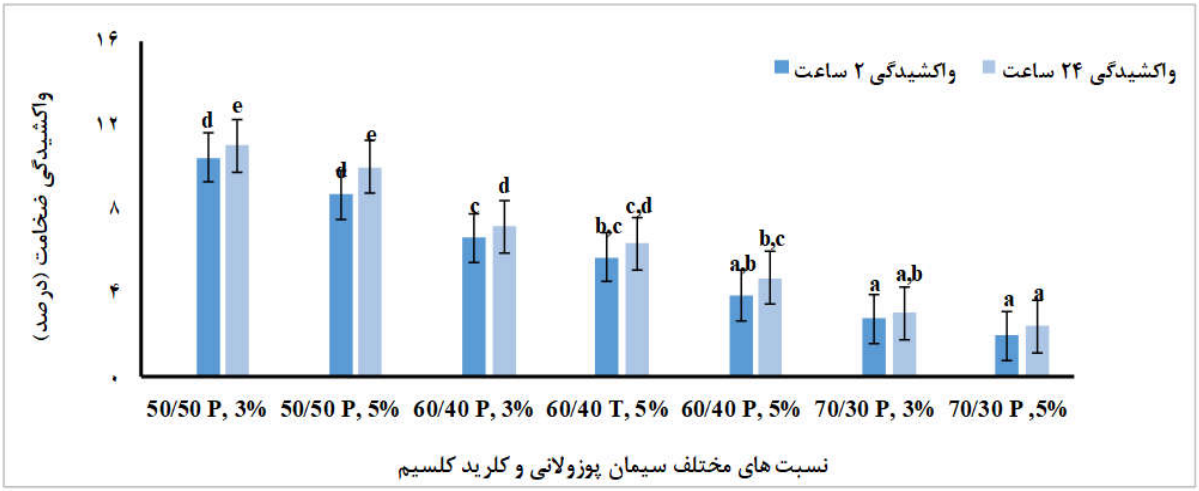
واکشیدگی ضخامت تخته خرده چوب سیمان

تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر عوامل متغیر بر واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت پانل‌های چوب سیمان در جدول ۴ نشان داده شدند و مشخص است که اثر عوامل متغیر بر واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت پانل-های چوب سیمان معنی‌دار است.

جدول ۴. تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر عوامل متغیر بر واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت پانل‌های چوب سیمان

خواص فیزیکی	گروه‌ها	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدارF	معنی‌داری (Sig)
واکشیدگی ضخامت ۲ ساعت	بین گروه‌ها	۶	۱۷۴/۴۱۳	۲۹/۰۶۹	۲۶/۳۳	**۰/۰۰۰
	درون گروه‌ها	۱۴	۱۵/۴۵۱	۱/۱۰۴		
	مجموع	۲۰	۱۸۹/۸۶۴			
واکشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت	بین گروه‌ها	۶	۱۹۶/۹۷۷	۳۲/۸۲۹	۲۴/۲۴۹	**۰/۰۰۰
	درون گروه‌ها	۱۴	۱۸/۹۵۳	۱/۳۵۴		
	مجموع	۲۰	۲۱۵/۹۳۰			

مطابق شکل ۱۰ بیشترین میزان واکشیدگی ضخامت نمونه‌ها پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در آب ۱۰/۴۷ درصد مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و ۳ درصد کلرید کلسیم و کمترین میزان آن ۱/۹۹ درصد مربوط نمونه‌های تولید شده با ۷۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و ۵ درصد کلرید کلسیم است. همچنین با افزایش نسبت سیمان از ۵۰ به ۷۰ درصد و مقدار کلرید آمونیوم از ۳ به ۵ درصد میزان واکشیدگی ضخامت نمونه‌های آزمونی پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب ۳۹۰ درصد کاهش یافت.



شکل ۱۰- تأثیر درصدهای مختلف سیمان پوزولانی ویژه و کلرید کلسیم بر واکشیدگی ضخامت نمونه‌ها، پس از ۲ و۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب (P = سیمان پوزولانی ویژه و T = سیمان پرتلند تیپ ۱- ۴۲۵)

همان گونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد افزایش نسبت سیمان و کلرید کلسیم از ۵۰ به ۷۰ درصد تأثیر قابل توجهی بر میزان کاهش واکشیدگی ضخامتی نمونه‌ها داشته است. به طوری که بیشترین میزان واکشیدگی ضخامت مربوط به نمونه‌های ساخته شده با ۵۰ درصد سیمان و ۳ درصد کلرید، (۱۰/۴۷ و ۱۱/۰۷ درصد به ترتیب برای ۲ و ۲۴ ساعت) و کمترین مقدار میزان واکشیدگی ضخامت برای نمونه‌های ساخته شده با ۷۰ درصد سیمان پوزولان و ۵ درصد کلرید کلسیم (۱/۹۹ و ۲/۴۱ درصد به ترتیب برای ۲ و ۲۴ ساعت) به دست آمد. نتایج واکشیدگی ضخامت نیز نشان می‌دهد که هر چند تأثیر سیمان پوزولانی ویژه و سیمان تیپ ۴۲۵-۱ بر واکشیدگی ضخامت از لحاظ آماری معنی‌دار نیست و هر دو در یک گروه قرار گرفتند اما در شرایط مشابه مقدار واکشیدگی ضخامت نمونه‌های ساخته شده با سیمان پوزولانی ویژه در مقایسه با سیمان تیپ ۱-۴۲۵ مقادیر کمتری را نشان می‌دهد. میزان واکشیدگی ضخامت ۲ و۲۴ ساعت مربوط به نمونه‌های ساخته با سیمان پوزولانی ویژه (۶۰ درصد سیمان و ۵ درصد کلرید کلسیم) در مقایسه با نمونه‌های شاهد به ترتیب ۴۶ و ۳۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. در تحقیق محمد کاظمی و همکاران (۲۰۱۳) نشان داده شد که افزودن نانو سیلیس به تخته‌های ساخته شده از پوستهٔ برنج و سیمان تا ۲ درصد باعث افزایش مقاومت‌های خمشی می‌شود. آنها بر این باور بودند که واکنش کلرید کلسیم، هیدروکسید کلسیم و نانو سیلیس حرارت لازم برای هیدراتاسیون سیمان و تشکیل ژل سیلیکات کلسیم H-S-Cرا تأمین کرده و اثر منفی مواد استخراجی را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد [۱۹].

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سیمان پرتلند پوزولانی ویژه و سیمان پرتلند تیپ ۱ بر مقاومت و استحکام چوب سیمان ساخته شده از خرده چوب سرشاخه‌های پسته انجام شد. نتایج آزمون ویکات نشان داد که زمان گیرایی سیمان پوزولانی ویژه از سیمان پرتلند بیشتر است. با اضافه کردن خرده چوب سرشاخه پسته به ترکیب دو نوع سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ و پوزولانی ویژه نیز مشخص شد که زمان گیرایی کامل تخته خرده چوب سیمان پوزولانی ویژه نسبت به سمان پرتلند تیپ ۱ در شرایط مشابه بیشتر است. تخته خرده چوب ساخته شده با سیمان پوزولانی ویژه در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند تیپ۱-۴۲۵ و در شرایط مشابه خواص فیزیکی و مکانیکی بهتری را نشان

دادند. با افزایش نسبت سیمان و کلرید کلسیم مقاومت‌های فیزیکی و مکانیکی پانل‌های چوب سیمان افزایش یافت. به طوری که بهترین پانل ساخته شده از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی، نمونه‌های ساخته شده با ۷۰ درصد سیمان پوزولانی ویژه و ۵ درصد ماده افزودنی کلرید کلسیم حاصل شد. به‌طورکلی چوب – سیمان ساخته شده با سیمان پوزولانی ویژه نسبت به سیمان پرتلند ۱-۴۲۵ دارای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مطلوب‌تری است و با داشتن وزنی سبک تر نسبت به بتن در می‌تواند در سازه‌های پیش‌ساخته همچون دیوارهای غیر باربر، پارتیشن سازی، پوشش‌های داخلی ساختمان، درب‌های مقاوم به آتش و عایق صدا مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

[1] Arab Bafrani, Z., Ghanei-Bafghi, M., Shirmardi, M. (2020). "Effect of wood residues of pistachio biochar on growth characteristics of Safflower", Journal of Soil Management and Sustainable Production, 10(3), pp. 73-94. doi: 10.22069/ejsms.2021.17831.1937. (In Persian).

[2] Imani, N., Mastri Farahani, M., Tabarsa, T., and Rezanjad, A. (2019). "Weathering resistance of pistachio-plastic multi-structure product treated with nano copper oxide". Wood and Forest Science and Technology Research, 27(1), pp. 61-72. (In Persian).

[3] Lisboa, F.J.N., Scatolino, M.V., de Paula Protásio, T., Júnior, J.B.G., Marconcini, J.M. and Mendes, L.M. (2020). "Lignocellulosic materials for production of cement composites: Valorization of the alkali treated soybean pod and eucalyptus wood particles to obtain higher value-added products". Waste and Biomass Valorization, 11, pp.2235-2245.

[4] Bołtryk, M., Anna, K. and Pawluczuk, E.(2020). "Cement composites with wood waste—design, features, and proposal of application". Aci Materials, 117.

[5] Setter, C., de Melo, R.R., do Carmo, J.F., Stangerlin, D.M. and Pimenta, A.S.(2020). "Cement boards reinforced with wood sawdust: an option for sustainable construction". SN Applied Sciences, 2, pp.1-9.

[6] Evans, P.D.(2002). "Wood-cement composites in the Asia-Pacific region". Australian Centre for International Agricultural Research.

[7] Castro, V.G., Azambuja, R.D.R., Bila, N.F., Parchen, C.F.A., Sassaki, G.I. and Iwakiri, S.(2018). "Correlation between chemical composition of tropical hardwoods and wood–cement compatibility". Journal of Wood Chemistry and Technology, 38(1), pp.28-34.

[8] Castro, V.G.D., Azambuja, R.D.R., Parchen, C.F.A. and Iwakiri, S.(2019). "Alternative vibro-dynamic compression processing of wood-cement composites using Amazonian wood". Acta Amazonica, 49(1), pp.75-80.

[9] Antwi-Boasiako, C., Ofosuhene, L. and Boadu, K.B.(2018). "Suitability of sawdust from three tropical timbers for wood-cement composites". Journal of Sustainable Forestry, 37(4), pp.414-428.

[10] Quiroga, A., Marzocchi, V. and Rintoul, I.(2016). "Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of Populus Euroamericana wood fibers". Composites Part B: Engineering, 84, pp.25-32.

[11] Silva, D.W., Scatolino, M.V., Pereira, T.G.T., Vilela, A.P., Eugenio, T.M.C., Martins, M.A., Mendes, R.F., Bufalino, L., Tonoli, G.H.D. and Mendes, L.M.(2020). "Influence of thermal treatment of eucalyptus fibers on the physical-mechanical properties of extruded fiber-cement composites". Materials Today: Proceedings, 31, pp.S348-S352.

[12] Kampragkou, P., Kamperidou, V. and Stefanidou, M.(2024). "Evaluation of hydrothermally treated wood fibre performance in cement mortars". Fibers, 12(3), p.21.

[13] Li, Y., Zhang, H., Fang, Q., Yu, T., Yang, J. and Li, W. (2024). "Optimization of mechanical properties and water resistance of sawdust-magnesium oxychloride cement composites based on orthogonal tests". Construction and Building Materials, 439, p.137300.

[14] Liu, Z., Han, C., Li, Q., Li, X., Zhou, H., Song, X. and Zu, F.(2022). "Study on wood chips modification and its application in wood-cement composites". Case Studies in Construction Materials, 17, p.e01350.

[15] Liu, Z., Wang, Y. and Han, C.(2023). "Study on mechanical behavior of modified wood chips reinforced cementitious composites and reinforcing mechanism of wood chips from the perspective of energy". Wood Material Science & Engineering, 18(6), pp.2069-2081.

[16] Alpar, T.L., Pavlekovics, A.A., Csoka, L. and Horvath, L.(2011) "Wood wool cement boards produced with nano minerals". In Proceedings 3rd Int. Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP32011) I: Peer reviewed contributions.pp. 75-82.

[17]Amsalu Fode, T., Chande Jande, Y.A., Kivevele, T. and Rahbar, N.(2024). "A review on degradation improvement of sisal fiber by alkali and pozzolana

for cement composite materials". Journal of Natural Fibers, 21(1), p.2335327.

[18] Khajeh Bonjar, F., Edalat, H., Tabarsa, T. and Rafighi, A.(2021). "The effect of dye and metals salts on white cement curing and properties of decorative wood wool-cement composite". Journal of Wood and Forest Science and Technology, 28(2), pp.1-19. https://doi: 10.22069/jwfst.2021.18860.1916.

[19] Mohammadkazemi, F., Doosthoseini, K., Enayati, A.A. and Azadfallah, M.(2013). "The Effects of Nano-SiO2 and Type of Lignocellulosic Materials on Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Boards". Forest and Wood Products, 66(2), pp.193-201.