Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 17, No. 1, Page 113 - 125 (2026)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2075469.1735

Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Cement-Based Composites Containing Recycled Paper Fibers

Valiullah Moosavi[1*]

1- Corresponding author, Department of wood science and paper technology, Cha.C., Islamic Azad University, Chalus, Iran. Email: valiullahmousavi@gmail.com

Received: October 2025 Accepted: December 2025

Abstract

Problem definition and objectives: In recent years, construction engineering has increasingly shifted toward the use of lightweight, durable, and environmentally compatible materials. Cement-based composites, as emerging construction materials, offer considerable potential for development depending on the availability of regional raw materials such as wood, cellulosic fibers, and waste paper. Given the limited wood resources and the growing demand for composite products, the use of fibers recovered from recycled printing-paper waste has been suggested as an economical and environmentally sustainable alternative. Accordingly, waste printing-paper fibers were employed in the present study. One of the major challenges in producing such composites is the inherent incompatibility of lignocellulosic fibers with Portland cement, which restricts the formation of strong and stable interfacial bonding within the composite matrix. Previous studies have shown that the incorporation of calcium chloride can enhance cement hydration and improve fiber–cement compatibility. The combined use of recycled cellulosic fibers with additives such as calcium chloride or nanosilica has also been reported to improve durability, phase cohesion, flexural performance, and reduce thickness swelling in wood–cement composites. Therefore, calcium chloride was utilized in this research to improve the setting behavior of cement in the presence of waste paper fibers. The primary objective of this study was to determine the optimum mixing ratio of recycled printing-paper fibers and cement, together with an appropriate dosage of calcium chloride, in order to enhance the physical and mechanical properties of the resulting composite.

Methodology: In this study, cellulosic fibers derived from waste printing paper were used as the reinforcing agent, while Type II Portland cement served as the matrix. Calcium chloride powder was employed as a setting accelerator and to improve the fiber–cement interfacial bonding at two levels (3% and 5% by cement weight). The specimens were prepared with three different fiber-to-cement ratios (30:70, 25:75, and 20:80 by weight) and cured for 28 days. Subsequently, they were tested for physical and mechanical properties according to EN standards. The obtained results were analyzed to evaluate the effects of the mixing ratios and calcium chloride content on the performance of the paper fiber–cement composites.

Results: The results showed that increasing the cement content from 70 to 80% led to a decrease in water absorption and thickness swelling, as well as an improvement in the density of the samples measured. In contrast, the effects of 3 and 5% calcium chloride on the physical and mechanical properties of the samples were not independently significant observed. The highest mechanical properties, including modulus of rupture, modulus of elasticity, and internal bond

strength, were obtained in the 20:80 cement-to-fiber ratio prepared. The use of calcium chloride in limited amounts contributed to the acceleration of setting and the improvement of fiber–cement bonding facilitated. However, at higher contents, a slight reduction in physical properties was observed due to porosity formation and volumetric stresses induced. Overall, optimizing the cement-to-fiber ratio and controlled application of calcium chloride played a crucial role in enhancing the performance of paper fiber–cement composites achieved.

Conclusion: The mixing ratio of recycled printing-paper fibers and cement plays a decisive role in improving the physical and mechanical properties of cement-based composites, as demonstrated in this study. An increase in the cement content to 80% led to higher density and enhanced mechanical strength, while water absorption and thickness swelling decreased. In contrast, raising the fiber content to 30% resulted in greater water absorption and thickness swelling, a phenomenon attributable to the porous structure of the fibers that provided additional capillary pathways for moisture penetration. The incorporation of 3% calcium chloride accelerated the hydration process and strengthened the fiber–cement interfacial bonding, whereas increasing its level to 5% caused a relative decline in both physical and mechanical properties because of salt crystallization and increased porosity. A significant interaction effect between cement and calcium chloride was observed only for internal bonding. The optimal performance was obtained in the formulation containing 20% fibers, 80% cement, and 3% calcium chloride. Overall, the use of recycled printing-paper fibers as a sustainable and environmentally compatible substitute has the potential to enhance composite performance and reduce the environmental impacts of building materials.

Keywords: Fiber–Cement Composites, Recycled paper fibers, Calcium chloride, Physical and Mechanical properties.

ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های سیمانی حاوی الیاف کاغذ باطله

ولی‌الله موسوی[۱*]

۱- نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران. رایانامه: valiullahmousavi@gmail.com

تاریخ دریافت: آبان ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: دی ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: در سال‌های اخیر، مهندسی ساختمان به‌سوی استفاده از مصالح سبک، مقاوم و سازگار با محیط‌زیست رفته است. چندسازه‌های پایه سیمان به‌عنوان مواد نوین ساختمانی، بسته به نوع مواد اولیه‌ی در دسترس مانند چوب، الیاف سلولزی و کاغذ باطله، در هر منطقه قابلیت توسعه دارند. با توجه به محدودیت منابع چوبی و افزایش تقاضا برای محصولات مرکب، استفاده از الیاف حاصل از بازیافت کاغذهای تحریری باطله به‌عنوان جایگزینی اقتصادی و زیست‌پذیر پیشنهاد می‌شود. از این‌رو در این تحقیق نیز از الیاف کاغذ تحریری باطله استفاده شد. یکی از چالش‌های اساسی در این چندسازه‌ها، ناسازگاری الیاف با سیمان پرتلند و ضعف در ایجاد پیوند مؤثر میان اجزاست. نتایج مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن کلرید کلسیم موجب بهبود گیرایی سیمان با الیاف شده است. استفاده‌ی هم‌زمان از الیاف سلولزی بازیافتی و افزودنی‌هایی مانند کلرید کلسیم یا نانو سیلیس، دوام و پیوستگی فازی در ساختار سیمانی را تقویت می‌کند و سبب افزایش مقاومت خمشی و کاهش واکشیدگی ضخامت در چندسازه‌های چوب–سیمان می‌شود. در این تحقیق نیز به منظور بهبود گیرایی سیمان با الیاف کاغذ باطله از کلرید کلسیم استفاده شد. تعیین نسبت بهینه‌ی اختلاط الیاف کاغذ تحریری باطله با سیمان همراه با کلرید کلسیم برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه تولیدی را می‌توان هدف اصلی پژوهش برشمرد.

مواد و روشها: در این پژوهش، الیاف سلولزی حاصل از پسماند کاغذهای تحریری به عنوان تقویت‌کننده و سیمان پرتلند نوع دوم به‌عنوان ماتریس به کار رفت. پودر کلرید کلسیم برای تسریع گیرایی و بهبود پیوستگی الیاف با سیمان در دو سطح ۳ و ۵ درصد استفاده شد. نمونه‌ها با سه نسبت وزنی مختلف الیاف به سیمان (۳۰: ۷۰، ۲۵: ۷۵ و ۲۰: ۸۰) ساخته و پس از آماده‌سازی ۲۸ روزه تحت آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی بر اساس استانداردهای EN قرار گرفتند. نتایج به‌منظور ارزیابی تأثیر نسبت اختلاط و میزان کلرید کلسیم بر خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های الیاف کاغذ–سیمان مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج: نتایج نشان داد افزایش درصد سیمان از ۷۰ به ۸۰ درصد موجب کاهش جذب آب و واکشیدگی ضخامت و بهبود دانسیته نمونه‌ها گردید، در حالی‌که اثر ۳ و ۵ درصد کلرید کلسیم بر خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها به‌طور مستقل معنی‌دار نبود. بیشترین مقاومت مکانیکی (مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی) در نسبت ۸۰/۲۰ سیمان به الیاف مشاهده شد. استفاده از کلرید کلسیم در مقادیر محدود باعث تسریع گیرایی و بهبود پیوند الیاف و سیمان شد، اما در درصدهای بالاتر به دلیل ایجاد تخلخل و تنش‌های حجمی، کاهش جزئی در خواص فیزیکی مشاهده گردید. در مجموع، تنظیم نسبت بهینه‌ی سیمان به الیاف و مصرف کنترل شده‌ی کلرید کلسیم در بهبود عملکرد چندسازه‌های الیاف کاغذ–سیمان نقش اساسی دارد.

نتیجه‌گیری: نسبت اختلاط الیاف کاغذ تحریری باطله و سیمان نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های پایه سیمان دارد. با افزایش درصد سیمان به ۸۰ درصد، دانسیته و استحکام مکانیکی افزایش و در مقابل، جذب آب و واکشیدگی ضخامت کاهش یافت، در حالی که افزایش درصد الیاف به ۳۰ درصد به دلیل ساختار متخلخل الیاف باعث افزایش مسیرهای موئینه برای نفوذ آب، باعث بالا رفتن میزان جذب آب و واکشیدگی ضخامت

نمونه‌ها شد. افزودن ۳ درصد کلرید کلسیم موجب تسریع فرآیند هیدراسیون و بهبود پیوند الیاف با سیمان شد، در حالی که افزایش آن به ۵ درصد به دلیل تبلور نمک‌ها و افزایش تخلخل، موجب کاهش نسبی خواص فیزیکی و مکانیکی گردید. اثر متقابل سیمان و کلرید کلسیم تنها بر چسبندگی داخلی معنی‌دار بود. بهترین عملکرد در ترکیب ۲۰ درصد الیاف، ۸۰ درصد سیمان و ۳ درصد کلرید کلسیم مشاهده شد. به‌طور کلی، استفاده از الیاف بازیافتی کاغذ تحریری به‌عنوان جایگزینی پایدار و سازگار با محیط زیست می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش اثرات مخرب مصالح ساختمانی در محیط زیست کمک کند.

واژه های کلیدی: چندسازه سیمان – الیاف، الیاف بازیافتی کاغذ تحریری، کلرید کلسیم، خواص فیزیکی و مکانیکی.

مقدمه

امروزه علم مهندسی ساختمان به سمت استفاده از مصالح سبک‌تر و مستحکم پیش می‌رود. از این بین چندسازه‌های پایه سیمان از جمله مواد نوینی هستند که توسعه آن در هر منطقه به مواد اولیهٔ موجود، یعنی چوب یا سایر مواد لیگنوسلولزی، کاغذ باطله و سیمان بستگی دارد. با توجه به کمبود منابع سلولزی در کشور و تقاضا برای مواد مرکب چوبی، می‌توان الیاف حاصل از بازیافت کاغذهای تحریری باطله را به علت مصرف زیاد و عدم بازیافت کامل آن به عنوان ماده اولیه در ساخت چندسازه الیاف کاغذ باطله – سیمان استفاده کرد. مزایای استفاده از الیاف کاغذهای باطله، کمک به محیط زیست از طریق بازیافت پسماند آن‌ها، دسترسی آسان، پایین بودن قیمت، کاهش استفاده از منابع جنگلی برای تولید محصولات مرکب چوبی و ایجاد اشتغال و درآمدزایی از طریق تولید محصول جدید اشاره کرد [۱]. یکی از مسائل عمده در تولید چندسازه با سیمان، عدم سازگاری گونه‌های چوبی یا الیاف بازیافتی با سیمان پرتلند و محدودیت در ایجاد اتصال مؤثر بین اجزا است. برای رفع این مشکل و بهبود سازگاری، از مواد افزودنی مختلفی مانند، کلرید کلسیم، سولفات آلومینیوم، سود سوزآور و غیره و یا از تیمارهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی مانند آبشویی، انبار کردن، خشک‌کردن می‌توان استفاده کرد [۲]. در این تحقیق از پودر کلرید کلسیم محلول در آب[1] به عنوان تسریع‌کننده‌ی گیرایی سیمان با الیاف کاغذی استفاده گردید تا اثر بازدارنده مواد قندی، همی سلولزها و مواد استخراجی الیاف بر فرآیند گیرایی چندسازه جلوگیری شود [۳].

Fernando و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، دوام و رفتار محیطی کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف سلولزی بازیافتی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف سلولزی حاصل از بازیافت کاغذ، علاوه بر کاهش اثرات مخرب زیست محیطی، موجب بهبود مقاومت خمشی نمونه‌های سیمانی می‌شود. همچنین، الیاف سلولزی بازیافتی شکل‌پذیری را در مواد کامپوزیتی افزایش داده و ضمن کاهش ترک‌خوردگی، پایداری ابعادی مناسبی برای کاربردهای ساختمانی فراهم کرد. نویسندگان تأکید کردند که نسبت بهینه الیاف و کنترل فرآیند اختلاط نقش مهمی در دستیابی به خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مطلوب دارد [۴]. Yusrizal و همکاران (۲۰۲۴) کاربرد الیاف طبیعی، به ویژه سلولزی، در کامپوزیت‌های سیمانی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن مقدار بهینه الیاف (۲–۱ درصد وزن سیمان) می‌تواند مقاومت فشاری و خمشی را افزایش دهد و الیاف به عنوان عامل مهار ترک عمل کنند، به طوری که رشد ترک‌ها محدود شده و دوام و شکل‌پذیری کامپوزیت بهبود می‌یابد. آن‌ها تأکید کردند که الیاف طبیعی، به‌عنوان جایگزینی پایدار و اقتصادی، پتانسیل بالایی برای تقویت سازه‌های سیمانی سبک و مقاوم دارند [۵]. Valizadeh Kiamahalleh و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی اثر الیاف بازیافتی کاغذ در بتن تقویت‌شده با متاکائولین پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن ۱ درصد الیاف کاغذی به همراه ۲۰ درصد متاکائولین، مقاومت فشاری و کششی بتن را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، در حالی که هم کشیدگی و جذب آب کاهش

[1] $CaCl_2.2(H_2O)$

می‌یابد. آن‌ها همچنین با بررسی میکروسکوپی نشان دادند که الیاف به عنوان عامل مهار ترک عمل کرده و موجب ساختار متراکم‌تر و بهبود دوام کامپوزیت می‌شوند. مطالعه تأکید می‌کند که ترکیب الیاف بازیافتی و متاکائولین، راهکاری پایدار و اقتصادی برای افزایش مقاومت و دوام بتن است [۶]. Enayati و همکاران (۲۰۱۲) در ارزیابی ویژگی‌های بلوک‌های چوب - سیمان ساخته شده از خاک‌اره بیان کردند که افزایش مقدار خاک‌اره در ساختار بلوک‌های آزمونی، باعث افزایش فشردگی مخلوط خاک‌اره و سیمان شده و سبب افزایش مقاومت فشاری، جذب آب و واکشیدگی ضخامت بلوک‌ها گردید [۷]. Hoseini و همکاران (۲۰۱۱)، امکان ساخت پانل‌های الیاف کاغذ باطله - سیمان را مورد بررسی قرار دادند. عوامل متغیر شامل نسبت سیمان به الیاف در سه سطح ۹۰ به ۱۰ درصد، ۸۵ به ۱۵ درصد و ۸۰ به ۲۰ درصد و میزان کلرید کلسیم به عنوان ماده افزودنی تسریع‌کننده‌ی گیرایی در دو سطح ۳ و ۵ درصد بر اساس وزن خشک الیاف در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت خمشی و کمترین میزان واکشیدگی ضخامت در ۲۴ ساعت در تخته‌های ساخته شده با نسبت سیمان به الیاف ۹۰ به ۱۰ درصد با مصرف ۵ درصد کلرید کلسیم مشاهده شد [۸].

Tabarsaو همکاران (۲۰۰۵)، نیز خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌های ساخته شده از خرده چوب حاصل از تراورس بازیافتی با سیمان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن کلرید کلسیم سبب بهبود گیرایی چندسازه و افزایش مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته گردید [۹]. مطالعات جدید نیز بر استفاده از الیاف سلولزی بازیافتی در ترکیبات سیمانی تأکید دارند. به‌عنوان نمونه، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که افزودن الیاف کاغذی بازیافت شده در بتن یا ملات‌های سیمانی، ضمن حفظ مقاومت فشاری، موجب افزایش شکل‌پذیری، جذب انرژی و بهبود رفتار خمش می‌شود.[۶، ۱۰ و ۱۱]. همچنین، استفاده از افزودنی‌هایی نظیر کلرید کلسیم و نانو سیلیس به‌طور هم‌زمان باعث بهبود پیوند بین فاز الیاف و سیمان و افزایش دوام در برابر شرایط محیطی می‌شود [۱۲]. با توجه به مطالب بیان شده، در این پژوهش از الیاف کاغذ تحریری باطله (جهت کاهش استفاده از منابع سلولزی بکر) در ترکیب با سیمان استفاده شد. به منظور بهبود اتصال سیمان با الیاف کاغذ باطله و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بر اساس تحقیقات گذشته از پودر کلرید کلسیم استفاده شد. تعیین بهترین شرایط نسبت اختلاط الیاف کاغذ تحریری باطله با سیمان همراه با پودر کلرید کلسیم به‌منظور ساخت چندسازه‌ی با خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب را می‌توان هدف اصلی این پژوهش برشمرد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از پسماند کاغذهای تحریری مکاتبات اداری مراکز آموزشی سازمان فنی و حرفه‌ای تهران به عنوان منبع الیاف سلولزی استفاده شد. سیمان پرتلند نوع دوم تولیدی شرکت سیمان لار سبزوار به عنوان ماده‌ی زمینه (ماتریس) به کار رفت. همچنین به منظور **تسریع در گیرایی سیمان و بهبود پیوستگی الیاف با زمینه‌ی سیمانی**، از **پودر کلرید کلسیم** ساخت شرکت مرک[2] **آلمان** به عنوان افزودنی تسریع‌کننده استفاده گردید.

روش کار

ابتدا کاغذهای تحریری باطله به ابعاد تقریبی ۵×۵ سانتی‌متر بریده و به مدت ۴۸ ساعت در آب غوطه‌ور شدند تا بافت سلولزی آن‌ها نرم شود. پس از آن، فرآیند فیبر زدایی توسط همزن با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه برای مدت‌زمان ۱۰ دقیقه انجام شد تا خمیر الیافی با پراکندگی مناسب حاصل گردد. برای جلوگیری از فاسد شدن و تخمیر الیاف دفیبره شده، آن‌ها بلافاصله در بسته‌های دربسته و در یخچال با دمای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا زمان انجام مراحل بعدی آماده باشند. در مرحله‌ی بعدی جهت اطمینان از دقت در تعیین نسبت‌های اختلاط، کلیه خمیرها در آون با دمای ۲±۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند. سپس به منظور جلوگیری از جذب مجدد رطوبت، الیاف خشک شده در دسیکاتور

[2] Merck

رطوبت‌گیر سرد قرار داده شده و در نهایت در کیسه‌های پلاستیکی زیپ‌دار در بسته نگهداری شدند. برای ساخت نمونه‌های آزمون، نسبت‌های وزنی الیاف به سیمان بر اساس وزن خشک و همچنین مقدار پودر کلرید کلسیم به‌عنوان عامل تسریع‌کننده‌ی گیرایی در جدول ۱ بیان شده است. تمام مواد بر اساس نسبت‌های تعیین‌شده توزین و برای آماده‌سازی مخلوط‌ها به کار گرفته شدند.

جدول ۱- ترکیب و کدگذاری تیمارهای نمونه‌های سیمان – الیاف با مقادیر مختلف کلرید کلسیم

سیمان (درصد)	الیاف (درصد)	کلرید کلسیم (درصد)	کد تیمار
۷۰	۳۰	۳	۷۰/۳۰
۷۰	۳۰	۵	
۷۵	۲۵	۳	۷۵/۲۵
۷۵	۲۵	۵	
۸۰	۲۰	۳	۸۰/۲۰
۸۰	۲۰	۵	

ساخت نمونه

در مرحله ساخت نمونه‌ها، ابتدا الیاف خشک‌شده بر اساس نسبت‌های مشخص شده در جدول ۱ وزن شدند. سپس برای تهیه خمیر، مقدار معینی آب به الیاف افزوده شد و تا دستیابی به مخلوطی یکنواخت، کاملاً هم زده شدند. پس از آن، سیمان پرتلند نوع دوم در نسبت‌های تعیین‌شده از قبل به خمیر اضافه گردید و مخلوط به مدت تقریباً ۱۵ دقیقه به آرامی هم زده شد تا ترکیب یکدست حاصل شود. برای تسریع گیرایی سیمان و بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی، از پودر کلرید کلسیم در دو سطح ۳ و ۵ درصد وزنی نسبت به وزن خشک سیمان ساخت شرکت مرک آلمان استفاده گردید. پودر کلرید کلسیم ابتدا در مقدار مشخصی آب حل شد و سپس محلول حاصل به مخلوط سیمان – الیاف افزوده گردید. ترکیب نهایی نیز به مدت‌زمان ۱۰ دقیقه دیگر هم زده تا مخلوطی یکنواخت و همگن حاصل شود. مقدار تقریبی آب مصرفی در ساخت هر تخته از رابطه-۱ محاسبه شد.

$$W = 50\%C + (0/30 - MC) \times F$$

که در آن، C= وزن سیمان برحسب گرم، F = وزن خشک الیاف برحسب گرم، MC = درصد رطوبت الیاف، W = مقدار آب مورد نیاز برحسب گرم

کیک حاصل در قالب‌هایی با ابعاد ۲۵×۳۰۰×۴۰۰ میلی‌متر ریخته و به‌طور یکنواخت پخش و پرس گردید. مدت‌زمان بسته شدن دهانه پرس به منظور جلوگیری از اتلاف مخلوط از کناره‌های قالب، به آرامی تا مدت ۱۰ دقیقه و مدت‌زمان اعمال فشار پرس ۴۵ دقیقه با فشار ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. پس از خروج تخته‌ها از پرس به منظور افزایش استحکام، در داخل قالب‌هایی باضخامت ۴۵ میلی‌متر شامل دو صفحه فولادی باضخامت ۱۵ میلی‌متر در بالا و پایین قرار داده شدند و به صورت چیدمان دستک گذاری شده به مدت ۲۴ ساعت نگهداری گردیدند. در پایان تعداد ۱۸ عدد تخته کاملاً سالم و بدون پیچ و تاب شامل سه نسبت مختلف سیمان به الیاف و دو نسبت مختلف کلرید کلسیم، هر یک در ۳ تکرار) باضخامت اسمی ۱۵ میلی‌متر و دانسیته ۱ گرم بر سانتیمتر مکعب تولید گردید. برای تثبیت ابعادی تخته-های نهایی پس از ۲۴ ساعت، به مدت حداقل ۲۸ روز در اتاقی با شرایط ثابت (رطوبت نسبی ۸۰ درصد و دمای ۲۳±۲ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. پس از پایان دوره متعادل‌سازی نمونه‌های آزمونی با ابعاد مشخص شده بر اساس استاندارد EN۳۱۷:۱۹۹۳ جهت اندازه‌گیری خواص فیزیکی و استاندارد EN۳۱۰:۱۹۹۳ برای اندازه-گیری خواص مکانیکی برش داده و آماده شدند.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی

بر اساس استاندارد EN۳۱۷:۱۹۹۳ خواص فیزیکی نمونه‌ها شامل دانسیته، جذب آب کوتاه و بلندمدت و واکشیدگی ضخامت کوتاه و بلندمدت به ترتیب بعد از ۲ و

۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب اندازه گیری گردید. همچنین بر اساس استاندارد EN۳۱۰:۱۹۹۳ خواص مکانیکی نمونه‌ها شامل مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته با استفاده از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ به صورت بارگذاری سه‌نقطه‌ای و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه و بر اساس استاندارد EN۳۱۹:۱۹۹۳، مقاومت چسبندگی داخلی نمونه‌ها با استفاده از ماشین WolPERT ۶,۶۷۰۰ D به ترتیب بر اساس روابط ۲، ۳ و ۴ موردمحاسبه قرار گرفت.

$$MOR = \frac{3PmaxL}{2bh^2}$$

MOR، مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال، $P_{\max}$، حداکثر بار شکست به دست آمده از آزمون خمش برحسب نیوتن، L، طول دهانه بارگذاری برحسب میلی-متر، b، پهنای نمونه برحسب میلی‌متر و h، ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر.

$$MOE = \frac{\Delta PL^3}{4\Delta dbh^3}$$

MOE، مدول الاستیسیته برحسب مگاپاسکال، h، ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر، b پهنای نمونه برحسب میلی‌متر، L، طول دهانه بارگذاری برحسب میلی‌متر، $\Delta P = 0.4P_{\max} - 0.1P_{\max}$ برحسب نیوتن و Δd، اختلاف میزان تغییر طول نمونه در دو نقطه $0.4P_{\max}$ و $0.1P_{\max}$ برحسب میلی‌متر.

$$IB = \frac{Pmax}{A}$$

$P_{\max}$، حداکثر بار شکست به دست آمده از آزمون خمش برحسب نیوتن و A، سطح مقطع نمونه برحسب میلی‌متر مربع.

تجزیه‌وتحلیل آماری

به‌منظور بررسی اثر ترکیب سیمان–الیاف و مقدار کلرید کلسیم بر خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) استفاده شد. در این طرح، ترکیب سیمان–الیاف به‌عنوان عامل اول در سه سطح (۳۰/۷۰، ۲۵/۷۵ و ۲۰/۸۰ درصد وزنی سیمان/الیاف) و مقدار کلرید کلسیم به‌عنوان عامل دوم در دو سطح ۳ و ۵ درصد در نظر گرفته شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با نرم‌افزار SPSSانجام شد.

نتایج و بحث

خواص فیزیکی

بررسی نتایج آزمون تجزیه واریانس دوطرفه نشان داد که میزان سیمان به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای چندسازه، تأثیر چشمگیری بر بسیاری از خصوصیات فیزیکی نمونه‌های ساخته‌شده از الیاف کاغذ تحریری باطله دارد. مطابق یافته‌ها، افزایش مقدار سیمان از ۷۰ به ۸۰ درصد موجب کاهش معنی‌دار جذب آب در دو ساعت و جذب آب کلی بدون قید زمان گردید؛ به‌طوری‌که این اثر در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌داری گزارش شد. این رفتار را می‌توان به نقش سیمان در ایجاد ساختار متراکم‌تر، کاهش فضاهای خالی و انسداد مسیرهای انتقال رطوبت نسبت داد که در نهایت منجر به کاهش نفوذپذیری آب در ساختار چندسازه می‌شود [۵]. در خصوص جذب آب ۲۴ ساعته، اثر اصلی سیمان معنی‌دار نبود؛ این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه سیمان بر نفوذ اولیه آب تأثیر قابل توجهی دارد، اما در مراحل اشباع کامل، نقش آن محدودتر بوده و ساختار فیبری ـ سلولزی الیاف همچنان تعیین‌کننده رفتار رطوبتی بلندمدت است. نتایج واکشیدگی ضخامت نیز روند مشابهی را نشان داد. اثر مستقل سیمان بر واکشیدگی ضخامت در دو ساعت و واکشیدگی ضخامت بدون قید زمان در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود؛ در حالی که در بازه ۲۴ ساعت، این اثر از نظر آماری معنی‌دار تشخیص داده نشد. به نظر می‌رسد که حضور سیمان در زمان‌های اولیه موجب محدود شدن تورم ناشی از جذب آب می‌شود؛ اما در زمان‌های طولانی‌تر، ساختار لیفی متورم‌شده اثر غالب را ایجاد کرده و نقش سیمان کاهش می‌یابد [۷].

از سوی دیگر، افزودن کلرید کلسیم (۳ و ۵ درصد) در هیچ‌یک از خصوصیات فیزیکی شامل جذب آب، واکشیدگی ضخامت و دانسیته اثر معنی‌داری نشان نداد. این موضوع بیانگر آن است که مقدار مورد استفاده‌ی کلرید کلسیم که عمدتاً به‌منظور تسریع واکنش

هیدراتاسیون سیمان به کار می‌رود، قادر به ایجاد تغییرات معنادار در رفتار رطوبتی چندسازه نبوده است. احتمالاً اثرات آن بیشتر در فرآیند گیرایی و مقاومت مکانیکی ظاهر می‌شود. همچنین هیچ‌یک از اثرات متقابل سیمان و کلرید کلسیم از نظر آماری معنی‌دار نبودند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دو عامل سیمان و کلرید کلسیم به‌صورت مستقل عمل کرده و حضور یکی موجب تقویت یا تضعیف اثر دیگری نمی‌شود. در ارزیابی دانسیته نیز میزان سیمان تأثیر معنی‌دار در سطح ۹۹ درصد نشان داد که بیانگر افزایش جرم مخصوص و تراکم ساختاری با افزایش مقدار سیمان است. در این ویژگی نیز اثر مستقل کلرید کلسیم و اثرات متقابل سیمان×کلرید کلسیم هیچ تأثیر قابل توجهی ارائه نکردند.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سیمان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده خصوصیات فیزیکی چندسازه‌های الیاف کاغذ باطله–سیمان است و نقش کلرید کلسیم در شرایط آزمون بر ویژگی‌های فیزیکی محدود بوده است؛ بنابراین، بهینه‌سازی رفتار رطوبتی و ابعادی این نوع چندسازه‌ها عمدتاً باید بر اساس تنظیم مقدار سیمان و طراحی مناسب نسبت‌های اختلاط انجام شود.

جدول ۲- آزمون تجزیه واریانس دوطرفه خواص فیزیکی چندسازه ساخته شده از الیاف کاغذ تحریری باطله - سیمان

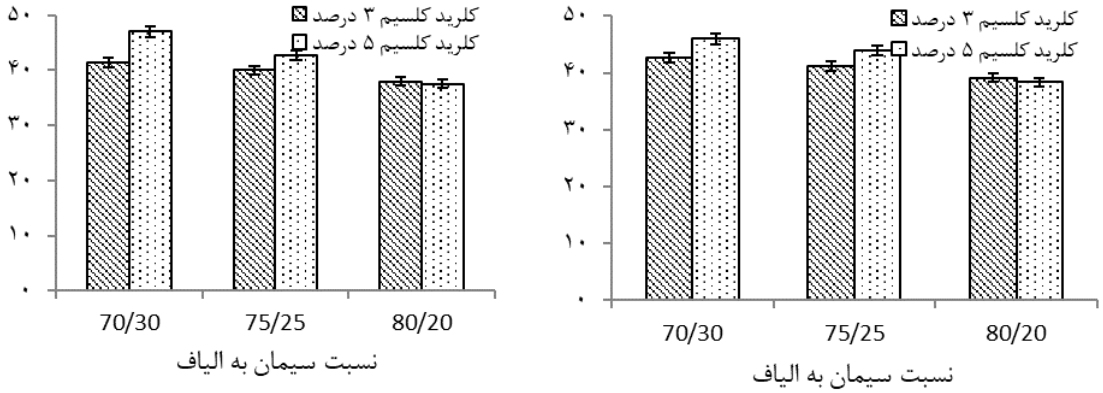
خواص فیزیکی	متغیر	درجه آزادی	F	معنی‌داری
جذب آب در ۲ ساعت	سیمان۱	۲	۷/۱۸**	۰/۰۰۱
	کلرید کلسیم	۱	ns۲/۲۵	۰/۱۴
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۱/۲۱n.s	۰/۳
جذب آب در ۲۴ ساعت	سیمان	۲	۲/۹۱n.s	۰/۶۳
	کلرید کلسیم	۱	۰/۷۷n.s	۰/۳۸
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۱/۲۱n.s	۰/۳
جذب آب بدون قید زمان	سیمان	۲	۷/۱۸**	۰/۰۰۱
	کلرید کلسیم	۱	۲/۵۶n.s	۰/۰۶
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۰/۴۵n.s	۰/۶۳
واکشیدگی ضخامت در ۲ ساعت	سیمان	۲	۵/۹۴**	۰/۰۰۱
	کلرید کلسیم	۱	۰/۹۸n.s	۰/۳۲
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۱/۰۹n.s	۰/۳۴
واکشیدگی ضخامت در ۲۴ ساعت	سیمان	۲	۲/۴۴n.s	۰/۰۹
	کلرید کلسیم	۱	۱/۹۶n.s	۰/۲۹
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۱/۰۹n.s	۰/۳۴
واکشیدگی ضخامت بدون قید زمان	سیمان	۲	۷/۶۸**	۰/۰۰۱
	کلرید کلسیم	۱	۰/۰۴n.s	۰/۸۳
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۰/۶۶n.s	۰/۹۳
دانسیته	سیمان	۲	۹/۴۱**	۰/۰۰۱
	کلرید کلسیم	۱	۲/۴۰n.s	۰/۱۲
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۱/۶۱n.s	۰/۲۱

**: معنی‌داری در سطح ۱ درصد

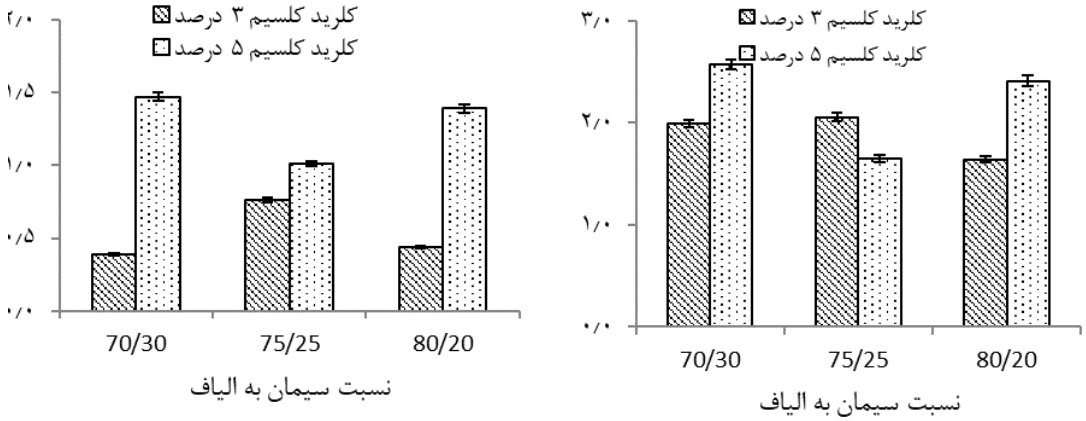
n.s: معنی‌دار نیست

بالاترین میانگین جذب آب و واکشیدگی ضخامت در زمان‌های ۲ و ۲۴ ساعت در تیماری با نسبت ۳۰ به ۷۰ درصد الیاف باطله به سیمان در ۵ درصد کلرید کلسیم مشاهده شد (شکل ۱ و ۲). افزایش میزان جذب آب و واکشیدگی ضخامت در نمونه‌هایی با نسبت بالاتر الیاف (۳۰ درصد)، به دلیل افزایش میزان الیاف سلولزی که عامل اصلی تخلخل و کاهش پیوستگی فاز سیمانی است می‌توان مربوط دانست [۱۳ و ۱۴]. ترکیب ۵ درصد کلرید کلسیم هم در این نمونه‌ها اگرچه باعث تسریع گیرایی و بهبود اولیه ماتریس شده، اما حضور الیاف زیاد (۳۰ درصد) و پیوند سطحی ضعیف بین فازهای آلی و معدنی، موجب نفوذپذیری بیشتر ساختار شده است [۱۵]. ساختار

متخلخل الیاف باعث افزایش مسیرهای موئینه برای نفوذ آب و در نتیجه افزایش واکشیدگی ضخامت می‌شود. در مقابل، افزایش مقدار سیمان به سطح ۸۰ درصد موجب پر شدن فضاهای خالی بین الیاف و تشکیل شبکه‌ی سخت‌تر و فشرده‌تر گردید که نفوذپذیری را کاهش داد [۱۶].

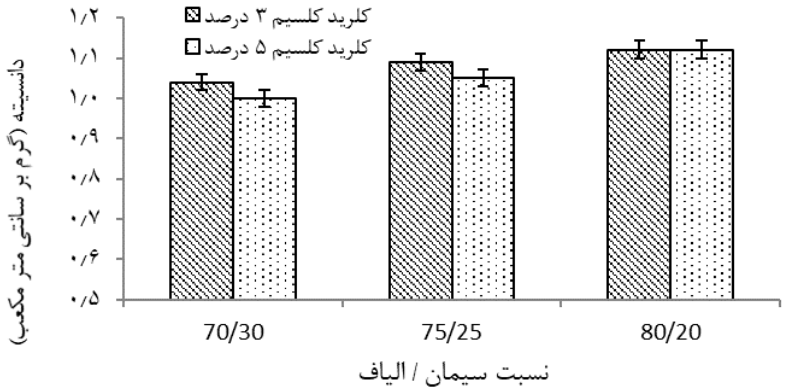


شکل ۱- اثر متقابل مقدار سیمان و کلرید کلسیم بر جذب آب تخته‌ها در ۲ و ۲۴ ساعت



شکل ۲- اثر متقابل مقدار سیمان و کلرید کلسیم بر واکشیدگی ضخامت تخته‌ها در ۲ و ۲۴ ساعت

نتایج شکل ۱ و ۲ نشان داد که میانگین جذب آب و واکشیدگی ضخامت در سطح ۵ درصد کلرید کلسیم کمی بالاتر بود هر چند افزودن کلرید کلسیم در سطوح ۳ و ۵ درصد اثر آماری معنی‌داری بر هیچ یک از خواص فیزیکی نداشت. کلرید کلسیم به عنوان یک تسریع‌کننده هیدراسیون سیمان عمل می‌کند و سبب تشکیل سریع‌تر فازهای هیدراتی مانند C–S–H و $Ca(OH)_2$می‌شود [۱۷]. این پدیده در کوتاه مدت می‌تواند تراکم ماتریس سیمان را بهبود دهد، اما در بلند مدت به دلیل رسوب و کریستالیته شدن نمک‌ها در نزدیکی الیاف سلولزی می‌تواند باعث تنش‌های حجمی در فصل مشترک الیاف و سیمان شده و سبب افزایش نفوذ آب و واکشیدگی ضخامت شود [۱۴]. در مقابل، بیشترین دانسیته در نسبت ۸۰ به ۲۰ سیمان به الیاف و در هر دو سطح کلرید کلسیم ۳ و ۵ درصد مشاهده شد (شکل ۳) که بیانگر تراکم بیشتر و کاهش فضای خالی در این نسبت است. افزایش دانسیته معمولاً با کاهش جذب آب و واکشیدگی ضخامت همراه است، زیرا حجم منافذ باز کاهش می‌یابد [۱۸]. از این‌رو کمترین جذب آب در نسبت ۸۰ به ۲۰ سیمان به الیاف مشاهده شد.



شکل ۳- اثر متقابل مقدار سیمان و کلرید کلسیم بر دانسیته تخته‌ها

به‌طورکلی، نتایج خواص فیزیکی در تخته‌های حاصل از الیاف کاغذ باطله و سیمان نشان داد که کنترل نسبت الیاف به سیمان نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود خواص فیزیکی دارد. حضورکلریدکلسیم می‌تواند در بهبود اتصال الیاف کاغذ و سیمان و مقاومت اولیه مؤثر باشد، اما استفاده‌ی مقادیر زیاد آن، به ویژه در ترکیبات با درصد بالای الیاف، باید با احتیاط انجام گیرد.

خواص مکانیکی

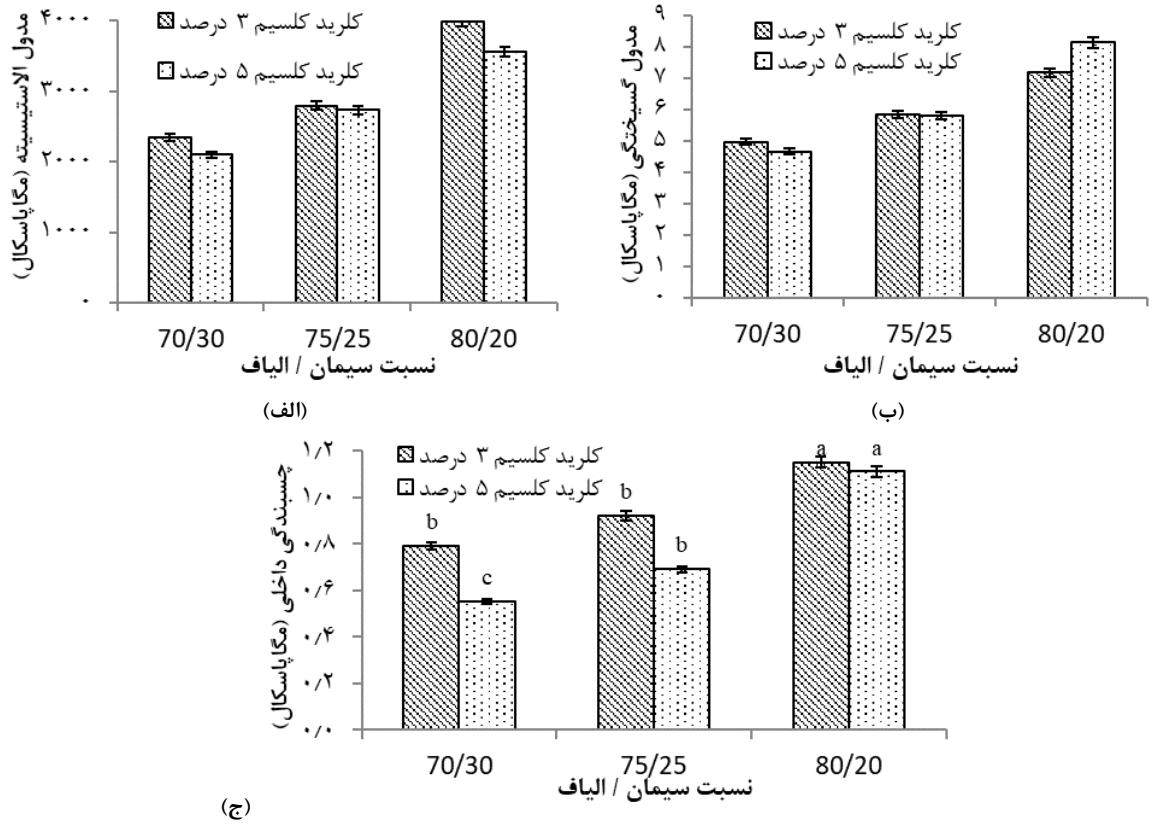
نتایج تحلیل واریانس دوطرفه نشان داد که **مقدار سیمان** به‌عنوان یکی از عوامل اصلی، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود خواص مکانیکی چندسازه‌های الیاف باطله کاغذ تحریر–سیمان دارد (جدول ۳). افزایش مقدار سیمان از ۷۰ به ۸۰ درصد موجب بهبود معنادار مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی و چسبندگی داخلی شد که بیانگر ایجاد ماتریس معدنی متراکم‌تر، بهبود ساختار فیزیکی بین الیاف و زمینه و افزایش مقاومت مکانیکی نمونه‌ها است. در مقابل، **کلرید کلسیم** در سطوح ۳ و ۵ درصد اثر معناداری بر هیچ‌یک از خصوصیات مکانیکی نداشت و این مسئله نشان می‌دهد که افزودنی تسریع‌کننده هیدراسیون (کلرید کلسیم)، نقش اساسی در تقویت خواص مکانیکی چندسازه ساخته شده ایفا نکرده است. با این حال، **اثر متقابل سیمان × کلرید کلسیم** در ویژگی چسبندگی داخلی معنادار بود که می‌تواند ناشی از تغییرات موضعی در ریزساختار، تسریع غیریکسان واکنش‌های هیدراسیون و تغییر کیفیت پیوند الیاف–ماتریس در حضور هم‌زمان دو عامل باشد [۸]. معنی‌دار نبودن اثر متقابل سیمان×کلرید کلسیم در سایر خواص نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی بیشتر وابسته به اثر مستقل مقدار سیمان است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که ساخت چندسازه‌های حاوی الیاف کاغذ باطله-سیمان باید عمدتاً بر کنترل میزان سیمان متمرکز باشد، در حالی‌که استفاده از کلرید کلسیم تنها در شرایط خاص می‌توان

جدول ۳- آزمون تجزیه واریانس دوطرفه خواص مکانیکی چندسازه‌ی ساخته شده از الیاف کاغذ تحریری باطله - سیمان

خواص مکانیکی	متغیر	درجه آزادی	F	معنی‌داری
مدول الاستیسیته	سیمان	۲	۱۲/۰۸**	۰/۰۰۱
	کلرید کلسیم	۱	ns۰/۶۱	۰/۴۳
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۰/۱۲n.s	۰/۸۸
مدول گسیختگی	سیمان	۲	۱۱/۸۵**	۰/۰۰۱
	کلرید کلسیم	۱	۰/۱۲n.s	۰/۷۲
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۰/۷۷n.s	۰/۴۶
چسبندگی داخلی	سیمان	۲	۵/۱۵**	۰/۰۱
	کلرید کلسیم	۱	۲/۲۲n.s	۰/۱۴
	سیمان×کلرید کلسیم	۲	۵/۹۳**	۰/۰۰۶

**: معنی‌داری در سطح ۱ درصدn.s: معنی‌دار نیست

نتایج اثر متقابل سیمان و کلرید کلسیم بر مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته نمونه‌های آزمونی در شکل ۴ (الف و ب) نشان داد که با افزایش مقدار سیمان، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته افزایش یافته است. افزایش پیوستگی ماتریس سیمانی و کاهش میزان فضای خالی در ساختار تخته‌های ساخته شده می‌تواند دلیل افزایش این خواص مکانیکی باشد. افزایش بیش از حد کلرید کلسیم به ۵ درصد ممکن است اثر منفی بر مقاومت نهایی چندسازه داشته باشد، زیرا پیوندهای سریع می‌تواند منجر به ایجاد ریزترک در ساختار شود [۱۹]. در ترکیبات الیافی، حضور الیاف کاغذی باعث کنترل ترک‌ها و انرژی شکست را افزایش می‌دهد [۲۰ و ۲۱]. در حضور کلرید کلسیم، مدول الاستیسیته در مقادیر پایین‌تر افزایش یافته است، زیرا $CaCl_2$ با تسریع تشکیل ژل‌های هیدراتاسیونی باعث سختی اولیه بالاتر می‌گردد [۲۲]. مطالعات اخیر نشان داده است که در کامپوزیت‌های الیافی سیمانی، رابطه مثبتی بین دانسیته و مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی وجود دارد و افزایش دانسیته می‌تواند منجر به افزایش مدول تا حد مشخصی شود [۲۳].



شکل ۴- اثر متقابل مقدار سیمان و کلرید کلسیم بر مدول الاستیسیته (الف)، مدول گسیختگی (ب) و چسبندگی داخلی (ج) تخته‌ها

در شکل ۴ (ج) افزایش مقدار سیمان به ۸۰ درصد سبب افزایش چسبندگی داخلی چندسازه الیاف-سیمان شده است. چسبندگی داخلی تحت تأثیر پیوند بین الیاف سلولزی و ماتریس سیمانی است. افزودن کلرید کلسیم می تواند این پیوند را در مراحل اولیه بهبود بخشد، زیرا ژل‌های هیدراتاسیونی سریع‌تر در اطراف الیاف تشکیل می‌شوند و در نتیجه تماس مؤثرتری بین فازها ایجاد می‌شود [۲۴]. مطالعات Hospodarova و همکاران (۲۰۱۸) و Stevulova و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که استفاده از الیاف کاغذی بازیافتی در مقادیر حدود ۲ تا ۵ درصد وزنی می‌تواند باعث افزایش مقاومت کششی و چسبندگی داخلی شود، اما در مقادیر بالاتر، سبب تخلخل و کاهش چسبندگی داخلی چندسازه شده است [۲۵ و ۲۶]. به‌طور کلی، نتایج حاصل از نمودارها نشان داد که افزایش مقدار سیمان به ۸۰ درصد

و استفاده محدود از کلرید کلسیم (۳ درصد) می‌تواند باعث بهبود دانسیته، مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی و چسبندگی داخلی در چندسازه‌های بر پایه الیاف کاغذ باطله شود. استفاده مقادیر زیاد کلرید کلسیم (۵ درصد) یا الیاف (۳۰ درصد) ممکن است سبب تخلخل و کاهش خواص مقاومتی گردد؛ بنابراین انتخاب نسبت بهینه سیمان به الیاف و میزان مناسب کلرید کلسیم در ترکیب چندسازه ضروری است [۲۰، ۲۳ و ۲۷].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر نسبت اختلاط سیمان به الیاف کاغذ تحریری باطله با نسبت‌های ۷۰/۳۰، ۷۵/۲۵ و ۸۰/۲۰ درصد وزنی همراه با مقادیر مختلف کلرید کلسیم در دو سطح ۳ و ۵ درصد وزنی نسبت به سیمان، بر خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های الیاف باطله پایه سیمان بررسی و نتایج زیر حاصل شد.

افزایش میزان سیمان از ۷۰ به ۸۰ درصد موجب افزایش دانسیته و استحکام مکانیکی گردید، در حالی که افزایش درصد الیاف از ۲۰ به ۳۰ درصد باعث بالا رفتن میزان جذب آب و واکشیدگی ضخامت نمونه‌ها شد. افزودن کلرید کلسیم در مقادیر محدود (۳ درصد) با تسریع فرآیند هیدراسیون سیمان و تشکیل سریع‌تر فازهای هیدراتی (C–S–H)باعث افزایش چسبندگی داخلی و بهبود گیرایی شد. افزایش بیش از حد آن (۵ درصد) به دلیل احتمال تبلور نمک‌ها در فصل مشترک الیاف و سیمان، موجب افزایش تخلخل و کاهش نسبی عملکرد گردید. اثر متقابل سیمان و کلرید کلسیم تنها در چسبندگی داخلی معنی‌دار بود. این امر نشان می‌دهد که در ترکیبات الیافی، بهبود پیوند بین فاز آلی و معدنی بیش از سایر ویژگی‌ها، تحت تأثیر هم‌زمان مقدار سیمان و میزان کلرید کلسیم قرار دارد. ترکیب بهینه در نسبت ۲۰ درصد الیاف و ۸۰ درصد سیمان همراه با ۳ درصد کلرید کلسیم مشاهده شد. این ترکیب بالاترین دانسیته، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی را در کنار کمترین جذب آب و واکشیدگی ضخامت نشان داد. نتایج نشان داد که نسبت اختلاط الیاف کاغذ تحریری باطله و سیمان نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های پایه سیمان دارد. به‌طور کلی، با توجه به محدود بودن منابع جنگلی تولید چندسازه‌های حاوی الیاف کاغذ باطله می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌های تولید، مصرف مواد لیگنوسلولزی حاصل از قطع درختان را نیز کاهش داده و محصولی سازگار با محیط‌زیست را فراهم آورد که از نظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، گزینه‌ای مناسب برای کاربرد به عنوان مصالح ساختمانی سبک به شمار آید.

منابع

[1] Zhao, X., Li, C. and Wang, Y., 2023. Sustainable use of recycled paper fibers in building composites: Mechanical and environmental performance. Materials, 16(14), 4770-4775.

[2] Zhang, J., Liu, Z. and Xu, H., 2022. Effect of chemical treatments on compatibility of lignocellulosic fibers with Portland cement. Construction and Building Materials, 345, 128446-128460.

[3] Soroushian, P. and Hassan, M., 2020. Accelerators and compatibility enhancement in cement composites reinforced with cellulosic fibers. Cement and Concrete Composites, 113, 103742-103752.

[4] Fernando, S., Gunasekara, C., Shahpasandi, A., Nguyen, K., Sofi, M., Setunge, S., Mendis, P. and Rahman, M. T. 2023. Sustainable Cement Composite Integrating Waste Cellulose Fibre: A Comprehensive Review. Polymers, 15(3), 520.

[5] Yusrizal, Y., Rahmawati, C., Zardi, M., Aprilia, S., Aulia, T. B. and Iqbal, I., 2024. Exploring concepts and application of natural fibers on cement-based composites. Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental, Energy, and Earth Science (ICEEES 2023).

[6] Valizadeh Kiamahalleh, M., Asadi, H., Ahmadi, M., and Hosseini, S. 2024. Mechanical, durability, and microstructure assessment of wastepaper fiber-reinforced concrete containing metakaolin. Materials, 17(11), 2608.

[7] Enayati, A. A., Hamzeh, Y., Mirshokraie, S. A. and Pourmohammadi, M., 2012. Evaluation of wood-cement blocks made from sawdust. Construction and Building Materials, 27(1), 21–25.

[8] Hoseini, M., Tajvidi, M. and Najafi, S. K., 2011. Use of waste paper fiber in cement–fiber composites. Journal of Wood Science, 57(5), 430–437.

[9] Tabarsa, T., Chui, Y. H. and Ung, Y. T., 2005. Mechanical and physical properties of cement-bonded particleboard from recycled wood. Wood and Fiber Science, 37(3), 453–462.

[10] Li, Q., Hu, Y. and Zhang, R., 2024. Mechanical performance of cement composites reinforced with recycled paper fibers. Structural Concrete, 25(3), 1541–1553.

[11] Torkaman, J., Soroushian, P. and Hassan, M., 2023. Recent advances in fiber-reinforced cementitious composites with waste cellulose fibers. Fibers, 11(6), 74-90.

[12] Martínez-López, M., González, F. and Pérez, A., 2022. Effect of calcium chloride and nano-silica on durability of fiber–cement composites. Journal of Composites for Construction, 26(4), 04022017-04022027.

[13] Simatupang, M. H. and Roffael, E., 1980. Cement-bonded particleboards: influence of wood species and additives on hydration of cement. Holzforschung, 34(5), 197–202.

[14] Wei, J. and Meyer, C., 2015. Improving degradation resistance of cellulose fiber in cement composites: effect of matrix modification. Cement and Concrete Composites, 59, 142–149.

[15] Ardanuy, M., Claramunt, J. and Toledo Filho, R. D., 2015. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review. Construction and Building Materials, 79, 115–128.

[16] Nemli, G., Aydin, I. and Zekovic, E., 2006. Factors affecting the properties of cement-bonded particleboards. Building and Environment, 41(6), 784–790.

[17] Soroka, I., 1979. Portland cement Paste and Concrete. Macmillan Press.

[18] Savastano, H., Warden, P. G. and Coutts, R. S. P., 2009. Microstructure and mechanical properties of waste fiber–cement composites. Cement and Concrete Composites, 31(10), 721–731.

[19] Rezaei Shahmirzadi, M. Gholampour, A., Hosseini, S. A., Ngo, T. D. and Nematzadeh, M., 2024. Wastepaper fiber-reinforced concrete containing recycled fibres. Structural Concrete, 25(4), 2931-2946.

[20] Amiandamhen, S. O. and Osadolor, S. O., 2020. Recycled waste paper–cement composite panels reinforced with kenaf fibres: Durability and mechanical properties. Journal of Material Cycles and Waste Management, 22, 1492-1500.

[21] Coutts, R. S. P., 1989. Wastepaper fibers in cement products. Cement and Concrete Research, 11(3), 143-147.

[22] Sanaev, V. G. and Karpov, V. I., 2014. Factors affecting the quality of wood-cement composites. *Wood Research, 59*(5), 67–74.

[23] Tuffrey, J. Siwseng, P., Laksanakit, Ch. and Chusilp, N., 2024. Enhancing the performance of waste paper pulp-cement composites, through the incorporation of natural rubber latex: A sustainable approach for high-performance construction materials. Construction and Building Materials, 430(6), 136345.

[24] Liu, Q. and Wu, Y., 2025. Reinforcement Effect of CaCl2 on Cementation Performance of Solid-Waste-Based Cementitious Materials for Fine Tailings. Molecules, 30(7), 1520.

[25] Hospodarova, V., Stevulová, N., Briancin, J. and Kostelanská, K., 2018. The effect of recycled paper fibers on mechanical properties of composites. Buildings, 8(3), 43.

[26] Stevulová, N., Schwarzová, I., Hospodárová, V. and Junák, J., 2016. Cement composites with recycled cellulose fibers. Chemical Engineering Transactions, 50, 367-372.

[27] Saeed, H., 2023. A review study of the use of calcium chloride in concrete. Journal of Engineering and Sustainable Development, 27(3), 339-349.