Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 16, No. 3, Page 437 - 455 (2025)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2073399.1730

Fabrication of Bio-Based Banana Fiber-Cement Composite and Evaluating its Technical Characteristics

Ebrahim Rezaei[1], Payam Moradpour[2*], Hanid zarea Hosseinabadai[3], Peyman Ahmadi[4]

1- M.Sc. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: pmoradpour@ut.ac.ir
3- Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4- Ph.D. Graduated, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: August 2025 Accepted: October 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Wood–cement composites, as a new generation of bio-based construction materials, combine desirable mechanical and environmental properties. However, their wider application has been constrained by incompatibility between the organic and inorganic phases, poor interfacial bonding, and limited dimensional stability. Meanwhile, agricultural residues such as banana fibers, owing to their high production volume, suitable cellulose content, considerable tensile strength, and renewable nature, represent a promising partial substitute for wood resources. In Iran, large-scale banana cultivation in Sistan and Baluchestan Province generates substantial fiber-rich residues, the valorization of which could both mitigate environmental impacts and promote the development of sustainable construction materials. Accordingly, this study aimed to investigate the effects of alkali treatment on banana fibers and determine their optimum incorporation level in wood–cement boards, focusing on the evaluation of physical, mechanical, and thermal properties.

Methodology: The required fibers were extracted from the pseudostems of the banana plant (Musa sapientum) and used in both untreated and 5% sodium hydroxide solution forms. In order to investigate the effect of mixing percentage, fibers to cement weight ratios of 5 to 95 and 10 to 90 were used. Type II Portland cement was selected as the primary binder, and 10% MCP concrete binder was used relative to the amount of water used in preparing the cement mortar to enhance interfacial cohesion in the construction of the panels. Cement panels without banana fibers were selected as control samples. The panels were fabricated via cold pressing and then test samples were prepared and evaluated in accordance with the standard to determine the technical properties of the panels, including: density, equilibrium moisture content, water absorption, and thickness swelling (after 2 and 24 hours of immersion in water), modulus of rupture, flexural modulus of elasticity, internal bonding, and fire resistance (ISO 11925-3). In order to investigate the effect of alkaline treatment on the chemical structure of banana fibers and their compatibility with cement, Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) was used, as well as to investigate the

microscopic structure of banana fiber-cement composite, measure fiber dimensions, examine the matrix of cement and fibers, and also to detect the effect of fiber treatment in banana fiber-cement panels, field emission scanning electron microscope (FESEM) was used. Data were statistically analyzed using ANOVA and Duncan's multiple range test at a 95% confidence level.

Results: FTIR spectra and FESEM images revealed that alkali treatment removed extractives, waxes, and surface impurities, thereby increasing surface roughness and enhancing fiber activity for bonding with the cement matrix. Physically, the density of treated composites (particularly at 5% fiber content) increased to values close to the control, while equilibrium moisture content, water absorption, and thickness swelling decreased significantly. Mechanically, incorporating 5% treated fibers yielded the highest improvements in MOR (10.03 MPa) and MOE (1789 MPa) compared with the control, whereas untreated fibers or higher fiber loadings led to property reductions due to weak adhesion and increased porosity. Internal bonding strength (IB) was maximized in 5% treated fiber boards, reflecting improved compaction and interfacial cohesion. Fire tests showed that all samples exhibited zero flame duration and no molten drips; mass loss ranged from 0.52% in the control to 0.21% in boards with 10% untreated fibers. While alkali treatment enhanced mechanical performance, the partial removal of surface components slightly reduced thermal stability compared to raw fibers.

Conclusion: The findings demonstrate that banana fibers, especially after alkali treatment and at an optimal content of 5%, can effectively improve the mechanical properties, dimensional stability, and interfacial compatibility of wood–cement composites. Furthermore, fire performance results indicated that despite the inherent combustibility of natural fibers, banana fiber–cement boards maintained safe and acceptable thermal behavior. Overall, alkali-treated banana fibers present a viable alternative to wood fibers in bio-based panel production and offer a sustainable pathway for agricultural waste utilization in green construction materials.

Keywords: Banana fiber-cement composite, alkaline treatment, physico-mechanical properties, fire resistance, FTIR spectroscopy, FESEM images.

ساخت کامپوزیت طبیعی الیاف موز- سیمان و ارزیابی مشخصه‌های فنی آن

ابراهیم رضایی[۱]، پیام مرادپور[۲*]، حمید زارع حسین‌آبادی[۳]، پیمان احمدی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: pmoradpour@ut.ac.ir
۳- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۴- دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: مهر ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: کامپوزیت‌های چوب–سیمان به‌عنوان نسل نوین مصالح ساختمانی زیست‌پایه، ترکیبی از ویژگی‌های مکانیکی و زیست‌محیطی مطلوب را ارائه می‌دهند، اما ناسازگاری میان فاز آلی و معدنی، ضعف در چسبندگی بین سطحی و پایداری ابعادی، کاربرد آن‌ها را محدود کرده است. از سوی دیگر، ضایعات کشاورزی همچون الیاف موز به دلیل حجم تولید بالا، درصد سلولز مناسب، استحکام کششی قابل توجه و ماهیت تجدید پذیر، گزینه‌ای بالقوه برای جایگزینی بخشی از منابع چوبی محسوب می‌شوند. در ایران نیز با توجه به تولید گسترده موز در استان سیستان و بلوچستان و حجم بالای ضایعات، بهره‌برداری از این منابع می‌تواند علاوه بر کاهش آثار زیست‌محیطی، مسیر توسعه مصالح ساختمانی پایدار را هموار سازد. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر تیمار قلیایی الیاف موز و تعیین درصد بهینه آن در ساخت تخته‌های چوب–سیمان، به ارزیابی خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی این کامپوزیت‌ها پرداخته است.

مواد و روشها: الیاف مورد نیاز از ساقه‌های کاذب گیاه موز (*Musa sapientum*) استخراج و به دو صورت خام و تیمار شده با محلول هیدروکسید سدیم ۵ درصد به کار گرفته شدند. جهت بررسی اثر درصد اختلاط، نسبت‌های وزنی ۵ به ۹۵ و ۱۰ به ۹۰ الیاف به سیمان مورد استفاده قرار گرفت. سیمان پرتلند نوع II به‌عنوان ماتریس معدنی اصلی انتخاب شد و از ۱۰ درصد چسب بتن MCP نسبت به مقدار آب مورد استفاده در تهیه ملات سیمان برای بهبود پیوستگی در ساخت پانل‌ها بهره گرفته شد. پانل‌های سیمانی فاقد الیاف موز به عنوان نمونه شاهد انتخاب شدند. پانل‌ها با استفاده از پرس سرد ساخته شده و سپس نمونه‌های آزمونی جهت تعیین خواص فنی پانل‌ها شامل: دانسیته، رطوبت تعادل، جذب آب و واکشیدگی ضخامت (بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب)، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته خمشی، چسبندگی داخلی و مقاومت به آتش (ISO 925-3)، مطابق با استاندارد تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت بررسی تأثیر تیمار قلیایی بر ساختار شیمیایی الیاف موز و سازگاری آن‌ها با سیمان از طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR) و همچنین برای بررسی ساختار میکروسکوپی کامپوزیت الیاف موز–سیمان، اندازه‌گیری ابعاد الیاف، بررسی ماتریس سیمان و الیاف و همچنین برای تشخیص اثر تیمار الیاف در پانل‌های الیاف موز- سیمان، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. داده‌ها با استفاده از آزمون ANOVA و آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد تحلیل شدند.

نتایج: بررسی طیف FTIR و تصاویر FESEM نشان داد که تیمار قلیایی موجب حذف ناخالصی‌ها، مواد استخراجی و موم‌های سطحی شده، زبری و سطح فعال الیاف را افزایش داد و بدین ترتیب، پیوند شیمیایی و مکانیکی با ماتریس سیمانی تقویت شد. نتایج فیزیکی نشان داد که دانسیته نمونه‌های تیمار شده (به‌ویژه در سطح ۵ درصد الیاف) افزایش یافت و به مقادیر نزدیک نمونه شاهد رسید، در حالی که رطوبت تعادل، جذب آب و واکشیدگی ضخامت کاهش معنی‌داری پیدا کردند. در آزمون‌های مکانیکی، افزودن ۵ درصد الیاف تیمارشده موجب افزایش چشمگیر مدول گسیختگی (۱۰ /۰۳ MPa) و مدول الاستیسیته خمشی (۱۷۸۹ MPa) نسبت به نمونه شاهد شد، در حالی‌که استفاده از الیاف خام یا

درصدهای بالاتر باعث کاهش این ویژگی به‌دلیل افت چسبندگی و افزایش تخلخل گردید. چسبندگی داخلی نیز در نمونه‌های ۵ درصد تیمار شده به حداکثر رسید که ناشی از افزایش تراکم و بهبود پیوند بین سطحی بود. آزمون مقاومت به آتش نشان داد که تمامی نمونه‌ها فاقد دوام شعله و گدازه بودند؛ همچنین بیشترین کاهش وزن مربوط به نمونه شاهد (۰/۵۲ درصد) و کمترین مقدار مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد الیاف خام (۰/۲۱ درصد) بود. اگرچه تیمار قلیایی اثر مثبت بر خواص مکانیکی داشت، اما به دلیل حذف نسبی مواد استخراجی، پایداری حرارتی در سطحی پایین‌تر از الیاف خام ثبت شد.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از الیاف موز، به‌ویژه پس از تیمار قلیایی و در درصد بهینه ۵ درصد، می‌تواند خواص مکانیکی، پایداری ابعادی و سازگاری بین سطحی تخته‌های چوب–سیمان را بهبود دهد. همچنین نتایج آزمون مقاومت به آتش نشان داد که ترکیب الیاف موز با ماتریس سیمانی، حتی با وجود ماهیت آتش‌گیر الیاف، عملکرد حرارتی ایمن و قابل قبولی دارد؛ بنابراین، الیاف موز تیمار شده به‌عنوان جایگزینی مناسب برای الیاف چوبی در تولید پانل‌های زیست‌پایه مطرح بوده و می‌تواند در راستای توسعه مصالح ساختمانی پایدار و کاهش ضایعات کشاورزی، راهکار مؤثری باشد.

واژه های کلیدی: کامپوزیت الیاف موز– سیمان، تیمار قلیایی، خواص فیزیکی– مکانیکی، مقاومت به آتش، طیف-سنجی FTIR، تصاویر FESEM.

مقدمه

کامپوزیت‌های چوب- سیمان به‌عنوان گروهی نوظهور از مصالح ساختمانی زیست‌پایه، حاصل ترکیب مواد لیگنوسلولزی با بسترهای معدنی، به‌ویژه سیمان، هستند که مزایای فیزیکی، مکانیکی و زیست‌محیطی هر دو ماده را در خود جمع می‌کنند [۱]. این ترکیبات که معمولاً از ذرات یا الیاف چوبی در ماتریس سیمانی ساخته می‌شوند، به دلیل ویژگی‌هایی نظیر استحکام خمشی و کششی بالا، پایداری ابعادی، مقاومت در برابر ضربه، دوام طولانی و هزینه تولید نسبتاً پایین، در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه صنایع ساخت‌وساز، مبلمان و زیرساخت‌های شهری قرار گرفته‌اند [۲]. از منظر زیست‌محیطی، تولید این کامپوزیت‌ها امکان استفاده مؤثر از ضایعات چوبی و کشاورزی را فراهم ساخته و از این طریق، به کاهش فشار بر منابع چوبی طبیعی و محدود کردن روند جنگل‌زدایی کمک می‌کند [۳]. این ویژگی، در راستای اهداف توسعه پایدار و کاهش ردپای کربن در صنعت ساختمان، اهمیتی فراوانی دارد. با وجود مزایای فوق، این کامپوزیت‌ها با چالش‌هایی همچون ناسازگاری میان ترکیبات آلی چوب و سیمان روبه‌رو هستند که می‌تواند باعث کاهش مقاومت مکانیکی شود. همچنین محدودیت‌هایی در استفاده از این مصالح در شرایط آب‌وهوایی مرطوب یا تحت بارگذاری‌های سنگین توسط دیگر پژوهشگران گزارش شده است [۴]. یکی از رویکردهای نوین برای رفع این چالش‌ها، جایگزینی بخشی از چوب با سایر منابع لیگنوسلولزی، به‌ویژه ضایعات کشاورزی و استفاده از فناوری‌های پیش تیمار برای بهبود چسبندگی بین فاز آلی و معدنی است [۵]. سالانه مقادیر قابل‌توجهی ضایعات لیگنوسلولزی از فعالیت‌های کشاورزی در سراسر جهان تولید می‌شود که شامل ساقه‌ها، برگ‌ها و سایر اجزای غیرقابل مصرف گیاهان است [۳]. یکی از این منابع، ضایعات درخت موز است که به‌ویژه در مناطق استوایی و نیمه استوایی، حجم بالایی از آن در فرآیند برداشت میوه تولید می‌شود. برآوردها نشان می‌دهد که از هر هکتار باغ موز، سالانه بین ۱۵ تا ۲۵ تن زیست‌توده باقی‌مانده شامل ساقه و برگ به‌عنوان ضایعات کشاورزی رها می‌شود [۶]. در ایران، به‌ویژه استان سیستان و بلوچستان که حدود ۹۹/۸ درصد از کل تولید موز کشور را به خود اختصاص داده و بخش کوچکی از تولید نیز در استان هرمزگان انجام می‌شود، کشت این محصول طی سال‌های اخیر روندی افزایشی داشته است. بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، در سال زراعی ۱۳۹۸–۱۳۹۹ حدود ۹۲۹۴۷ تن موز در سطح ۴۸۳۸ هکتار برداشت شده که معادل ۲۰ درصد نیاز داخلی است و مابقی از طریق واردات تأمین گردیده است [۶]. حجم بالای این ضایعات و مدیریت ناکارآمد آن‌ها که غالباً به دفن یا سوزاندن منجر می‌شود،

پیامدهای منفی زیست‌محیطی از جمله انتشار دی‌اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای به همراه دارد [۷]. بهره‌برداری صنعتی از این ضایعات، می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، به‌عنوان منبع جایگزین چوب در صنایع کامپوزیت‌سازی مطرح شود. الیاف استخراج‌شده از ساقه کاذب موز، به دلیل دارا بودن درصد بالای سلولز (۶۳–۶۴ درصد)، مقدار مناسب همی‌سلولز (حدود ۱۹ درصد) و لیگنین (حدود ۵ درصد)، از استحکام کششی بالا (۵۴۰ تا ۹۰۰ مگاپاسکال) و دانسیته نسبتاً پایین (۳۵/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برخوردارند [۸، ۹]. این ویژگی‌ها موجب شده است که الیاف موز در دسته الیاف طبیعی با عملکرد فنی مناسب برای کاربردهای ساختمانی و کامپوزیتی قرار گیرند. افزون بر این، این الیاف زیست‌تجزیه‌پذیر، تجدید پذیر، مقرون‌به‌صرفه و دارای مقاومت نسبی در برابر تخریب زیستی هستند [۱۰]. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که افزودن الیاف موز به ماتریس سیمانی می‌تواند موجب افزایش مقاومت خمشی، بهبود چقرمگی شکست و کاهش ترک‌خوردگی شود [11، ۱۲]. تحقیقات Thanushanو Sathiparan (۲۰۲۲)، نشان می‌دهد استفاده از این الیاف در بتن، علاوه بر بهبود مقاومت مکانیکی، ترک‌خوردگی ناشی از بارگذاری را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهد [13]. در کامپوزیت‌های چوب–سیمان، جایگزینی بخشی از الیاف چوبی با الیاف موز، علاوه بر کاهش وابستگی به منابع چوبی، می‌تواند منجر به بهبود پایداری ابعادی و افزایش دوام محصول در برابر شرایط محیطی شود.

پیش تیمار شیمیایی الیاف، به‌ویژه با محلول‌های قلیایی یا مواد سیلانی، یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود چسبندگی بین الیاف طبیعی و ماتریس معدنی است [۱۴]. این فرآیند با حذف لایه‌های مومی و ترکیبات غیر سلولزی از سطح الیاف، موجب افزایش زبری سطحی و ایجاد نقاط فعال بیشتر برای پیوند با سیمان می‌شود [۱۵]. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که چنین پیش تیمارهایی می‌توانند مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کامپوزیت را تا بیش از ۵۰ درصد نسبت به نمونه‌های بدون تیمار افزایش دهند [۱۶]. انتخاب نسبت بهینه الیاف به سیمان نیز نقش کلیدی در دستیابی به خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب دارد. نسبت‌های بسیار بالای الیاف ممکن است باعث کاهش مقاومت فشاری شوند، در حالی که نسبت‌های بسیار پایین بهبود معنی‌داری در خواص ایجاد نمی‌کند [۱۷]. مطالعات حاکی از آن است که نسبت‌های میانی، تعادلی میان تقویت مکانیکی و پایداری ساختاری ایجاد می‌کنند [۱۸]. با توجه به روند رو به رشد تقاضا برای مصالح ساختمانی پایدار، استفاده از منابع تجدید پذیر و محلی، همچون ضایعات کشاورزی و به‌ویژه الیاف موز، می‌تواند یک راهبرد کلیدی برای توسعه مواد کامپوزیتی نوین باشد [19]. این رویکرد نه‌تنها به کاهش ضایعات و آلودگی‌های ناشی از دفن یا سوزاندن کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به ایجاد ارزش افزوده اقتصادی برای جوامع محلی منجر شود [۲۰]. موفقیت‌های صنعتی در کشورهای جنوب شرق آسیا و آمریکای لاتین نشان داده که به‌کارگیری الیاف موز در تولید پانل‌های چوب–سیمان، علاوه بر قابلیت فنی، از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است [۲۱]. این تجربه‌ها می‌تواند الگویی برای ایران باشد، به‌ویژه با توجه به تمرکز کشت موز در مناطق جنوبی کشور. بر مبنای این ضرورت‌ها، پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان ساخت پانل‌های چوب–سیمان با استفاده از الیاف موز بکر و پیش تیمار شده و ارزیابی خواص فنی آن‌ها طراحی شده است. اهداف جزئی شامل تعیین نسبت بهینه الیاف به سیمان، بررسی اثر پیش تیمار شیمیایی بر خواص مکانیکی و فیزیکی و تحلیل کارایی این نوع کامپوزیت‌ها به‌عنوان مصالح ساختمانی پایدار است. نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی برای توسعه صنعتی و تجاری‌سازی این فناوری در کشور باشد.

مواد و روش‌ها

مواد

در این تحقیق، جهت تهیه الیاف مورد نیاز از بقایای ساقه گیاه موز (Musa sapientum) استفاده شد. برای این منظور ساقه‌های کاذب گیاه موز از باغات نواحی جنوبی استان سیستان و بلوچستان تهیه و به کارگاه مبلمان و فرآورده‌های مرکب گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج منتقل شدند (شکل ۱). پس از تمیز کردن اولیه، تنه‌ها به طول‌های مناسب (بین ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) برش داده شدند و سپس برای مرطوب نگه‌داشتن الیاف، تنه‌های

بریده‌شده داخل آب به صورت غوطه‌ور نگه‌داری شدند. به‌عنوان ماده اتصال‌دهنده معدنی اصلی، از سیمان پرتلند نوع II تولید شرکت سیمان آبیک استفاده شد که از بازار مصالح ساختمانی کرج تهیه شد. چسب بتن (MCP) مورداستفاده از شرکت فراز پایه البرز خریداری شد. مشخصات سیمان پرتلند تیپ II و چسب بتن مورد استفاده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است.

هیدروکسید سدیم (NaOH) مورد نیاز برای پیش تیمار قلیایی الیاف موز و با خلوص آزمایشگاهی برای حذف ناخالصی‌ها، چربی‌های ممکن و مواد استخراجی سطحی و بهبود خواص چسبندگی الیاف به ماتریس سیمانی از شرکت داخلی (کد محصول ۱۰۶۴۹۸) تهیه شد.

شکل ۱- ساقه‌های جمع‌آوری شده موز جهت تهیه الیاف مورد نیاز

جدول ۱- مشخصات سیمان پرتلند تیپ II مورد استفاده

مشخصه	مقادیر	تصویر محصول
دانسیته	۳۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	
مقاومت فشاری	حداقل مقاومت فشاری ۴۵ مگاپاسکال	
ترکیب شیمیایی	حداکثر ۶۵ درصد کلسیم سیلیکات و حداکثر ۶۷ درصد کلسیم آلومینات	
مقاومت در برابر سولفات‌ها	متوسط	
مدت زمان گیرایی	حدود ۳۵ روز	

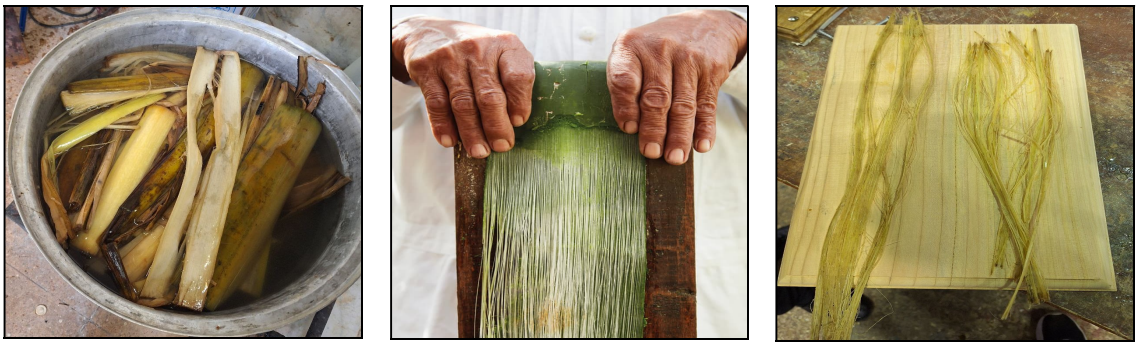
جدول۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی چسب بتن MCP مورد استفاده

ویژگی	مقادیر	تصویر محصول
وزن مخصوص A+B (gr/cm^3)	۱/۱	
رنگ	سفید شیری	
pH	۶	
مواد جامد (٪)	۴۵	
مقاومت کششی (N/mm^2) (ASTM D412)	۱/۵	
مقاومت چسبندگی به بتن (N/mm^2)	۲/۵	
زمان کاربری (Pot life)	۳۰ دقیقه در دمای ۳۰ درجه	
زمان خشک شدن سطحی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۲- ۱/۵ ساعت	

روش‌های اجرایی تحقیق

فرآیند جداسازی الیاف از بقایای تنه موز به روش مکانیکی انجام شد. نمونه‌های ساقه پیش از جداسازی، در آب غوطه‌ور نگه‌داری شدند تا رطوبت آن‌ها حفظ و از شکنندگی جلوگیری شود. جداسازی به گونه‌ای انجام شد که الیاف با حداقل آسیب فیزیکی استخراج شوند. پس از این مرحله، برای کاهش رطوبت، الیاف در کوره کارگاهی با دمای ۲±۱۰۳ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند (شکل۲). الیاف خشک‌شده در کیسه‌های پلاستیکی غیرقابل نفوذ نگه‌داری شدند تا از تبادل رطوبتی با محیط

جلوگیری شود. به‌منظور بهبود ویژگی‌های سطحی الیاف و ارتقای چسبندگی به ماتریس سیمانی، تیمار شیمیایی جزئی با محلول هیدروکسید سدیم انجام شد. برای این منظور، الیاف موز به مدت ۱۲ ساعت در محلول NaOH با غلظت ۵ درصد و در دمای محیط غوطه‌ور گردیدند. این عملیات با هدف آماده سازی سطح و حذف بخشی از ترکیبات و ناخالصی‌های سطحی صورت گرفت.



(الف) (ب) (ج)

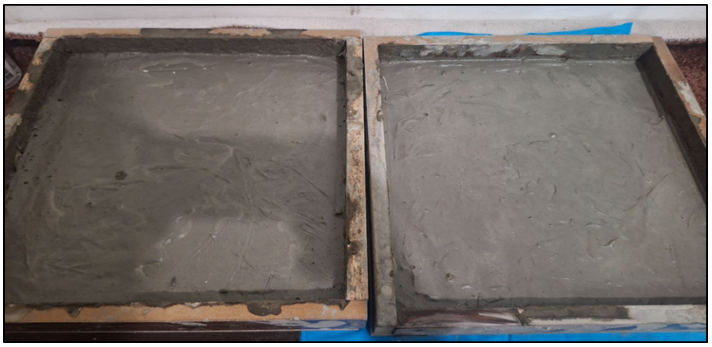
شکل ۲- تهیه الیاف موز: الف) نگه‌داری در آب، ب) استخراج و جداسازی مکانیکی الیاف موز، ج) الیاف خشک‌شده

در این پژوهش، دو متغیر اصلی شامل نوع پیش تیمار الیاف موز (بدون پیش تیمار و تیمار با محلول هیدروکسید سدیم) و درصد اختلاط الیاف موز با سیمان (۵ به ۹۵ و ۱۰ به ۹۰ درصد نسبت وزنی) انتخاب و سایر عوامل ثابت نگه‌داشته شدند. به‌منظور مقایسه، پانل‌های سیمانی فاقد الیاف به‌عنوان نمونه شاهد تولید گردیدند. طرح کامل آزمایش‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- طرح آزمایشات تحقیق

پیش تیمار الیاف موز	الیاف موز به سیمان (درصد وزنی)
-	۰ به ۱۰۰
بدون تیمار	۵ به ۹۵
	۱۰ به ۹۰
تیمار با هیدروکسید سدیم	۵ به ۹۵
	۱۰ به ۹۰

به‌منظور تولید پانل‌های سیمانی حاوی الیاف موز با دانسیته هدف g/cm3 ۱/۱±۰/۱، مقدار مورد نیاز از الیاف و سیمان بر اساس نسبت‌های وزنی تعیین‌شده در طرح آزمایش محاسبه گردید. برای آماده‌سازی ملات سیمان، از ۲۰۰۰ میلی‌لیتر آب استفاده شد که به آن ۲۰۰ گرم چسب بتن (معادل ۱۰٪ وزن آب مصرفی) افزوده شد. افزودن چسب بتن با هدف افزایش پیوستگی بین فاز الیاف و ماتریس سیمانی و بهبود مقاومت مکانیکی صورت گرفت. فرآیند اختلاط شامل هم زدن سیمان با چسب بتن و آب به مدت ۱۵ دقیقه در میکسر مکانیکی جهت دستیابی به ملاتی یکنواخت بود. سپس الیاف موز طبق طرح اختلاط به ملات اضافه و مخلوط‌سازی ادامه یافت تا توزیع یکنواخت الیاف در ماتریس حاصل شود. مخلوط آماده‌شده در قالب‌های فلزی با ابعاد اسمی ۱/۶×۳۰×۳۰ سانتی‌متر ریخته شد. شکل‌گیری پانل‌ها با پرس سرد تحت فشار ۱۵ کیلوگرم تا رسیدن به ضخامت نهایی ۱۶ میلی‌متر صورت گرفت (شکل ۳). پانل‌های ساخته‌شده به مدت یک هفته در شرایط محیطی و هوای آزاد قرار داده شدند تا خشک شدن اولیه صورت گیرد. در طول این مدت، برای تسهیل فرآیند هیدراسیون و جلوگیری از ترک‌خوردگی ناشی از خشک‌شدن سریع، سطح پانل‌ها به‌طور منظم با آب اسپری و مرطوب‌سازی شد. پس از این مرحله، پانل‌ها به مدت دو هفته داخل اتاق کلیما در دمای ۲۰±۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲ ± ۶۵ درصد قرار گرفتند تا به رطوبت تعادل ۱۲ درصد برسند. پس از تعادل رطوبتی، نمونه‌های آزمونی بر اساس استانداردهای مربوطه و مطابق با جدول ۴ برش داده شده و برای انجام آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفتند.



شکل ۳-آماده‌سازی پانل‌های الیاف موز- سیمان در قالب‌های پیش ساخته

جدول ۴- شرح آزمون‌ها و ابعاد نمونه‌ها (ضخامت پانل‌ها ۱۶ میلی‌متر)

نوع آزمون	شرح آزمون	ابعاد نمونه (cm2)	تعداد نمونه	شماره استاندارد
فیزیکی	دانسیته و رطوبت	۵× ۵	۶	DIN EN 323
	جذب آب و واکشیدگی ضخامت	۵× ۵	۶	DIN EN 634
	مقاومت به آتش	۱۰× ۱۵	۶	ISO 11925-3
مکانیکی	MOR و MOE	۲۰× ۵	۶	DIN EN 634
	چسبندگی داخلی	۵× ۵	۶	DIN EN 319

از آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR) به منظور اطمینان از اصلاح الیاف موز توسط دستگاه مدل Tensor 27 ساخت شرکت Bruker آمریکا و در آزمایشگاه مرکزی پردیس علوم پایه دانشگاه تهران استفاده شد. ذرات الیاف موز تیمار شده با هیدرواکسید سدیم و الیاف تیمار نشده (شاهد) به‌صورت پودر تهیه و استفاده شدند. طیف‌سنجی در دامنه عدد موجی cm-1 ۴۰۰۰-۴۰۰ و ۶۵ اسکن در هر ثانیه انجام شد. نمونه‌ها قبل از آزمون تا رسیدن به رطوبت صفر درصد، داخل آون آزمایشگاهی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. همچنین برای بررسی ساختار میکروسکوپی کامپوزیت چوب-سیمان، اندازه‌گیری ابعاد الیاف، بررسی ماتریس سیمان و الیاف و همچنین برای تشخیص اثر تیمار الیاف در پانل‌های چوب سیمان، از میکروسکوپ FESEM با نام TESCAN، مدل Lmu Mira two ساخت کشور جمهوری چک واقع در دانشکده برق دانشگاه تهران استفاده شد.

جهت انجام آزمون مقاومت به آتش، نمونه‌ها در معرض شعله مستقیم قرار گرفته و بعد از اعمال آتش، زمان دوام آتش و گدازش بر روی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. بعد از قرار دادن در آون و با اندازه‌گیری وزن خشک نمونه‌های تحت آزمون، میزان کاهش جرم با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده و درصد سطح کربونیزه نیز با استفاده از نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری شد.

$$WL_f(\%) = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1}\right) \times 100 \qquad (۱)$$

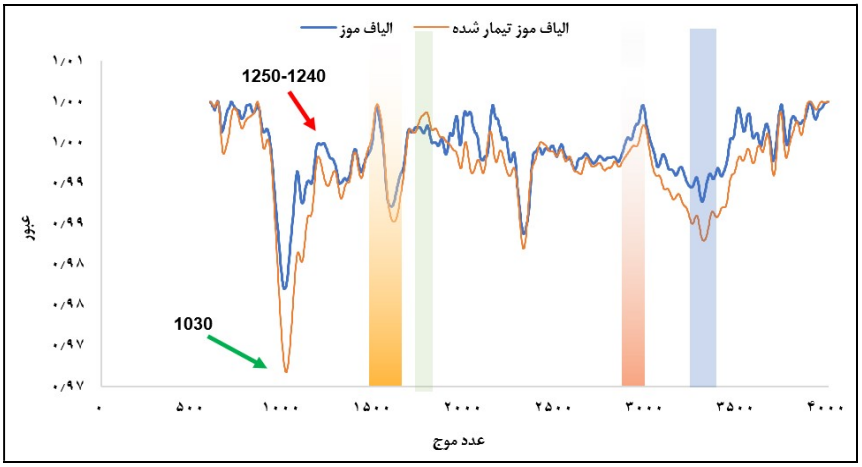
که در این رابطه، WLf درصد کاهش وزن بر اثر احتراق، m1 وزن خشک قبل از احتراق (g) و m2 وزن خشک بعد از احتراق (g) می‌باشد.

به‌منظور بررسی و تحلیل عوامل متغیر و نتایج به‌دست آمده، از طرح پایهٔ کاملاً تصادفی در قالب آزمایش فاکتوریل استفاده شد. بر این اساس از ترکیب سطوح عوامل متغیر، ۵ تیمار به دست آمد که با در نظر گرفتن ۳ تکرار برای هر تیمار، در مجموع ۱۵ پانل آزمایشگاهی و از هر تخته ۲ نمونه آزمونی ساخته شدند. پس از جمع‌آوری داده‌ها، برای مقایسه و تحلیل نتایج از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد. تمام آنالیزهای آماری در بستر نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ صورت گرفت. سطح معنی‌داری در این مطالعه ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

آنالیز طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR)

بررسی طیف FTIR دو نمونه نشان می‌دهد که تیمار قلیایی منجر به تغییرات قابل توجهی در باندهای جذبی مشخصه شده است (شکل ۴). نتایج حاصل بیانگر تغییرات قابل توجهی در گروه‌های عاملی سطحی بود که نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود سازگاری الیاف با ماتریس سیمانی دارند. در ناحیه $3300-3400\ cm^{-1}$، شدت باند مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (–OH) کاهش یافت که می‌تواند بیانگر حذف بخشی از گروه‌های هیدروکسیل آزاد یا ایجاد پیوندهای هیدروژنی جدید میان زنجیره‌های سلولزی باشد. این پدیده با گزارش‌های Xie و همکاران (۲۰۱۰) و Kalia و همکاران (۲۰۱۱)، همخوانی دارد که نشان دادند تیمار قلیایی موجب بازآرایی ساختار سلولز و کاهش آب‌دوستی سطح الیاف می‌شود [۲۲]. در ناحیه $1730\ cm^{-1}$، باند مشخصه (C=O)مربوط به گروه‌های کربونیل است، نشان‌دهنده‌ی تجزیه و حذف بخشی از مواد استخراجی و ترکیبات آمورف نظیر قندهای محلول و استرهای سطحی می‌باشد. این تغییر با یافته‌های Li و همکاران (۲۰۰۷)، مطابقت دارد. همچنین در محدوده $2800-2900\ cm^{-1}$ که مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای C–H است، اما کاهش شدت مشاهده شد در این بخش می‌تواند به کاهش محتوای مواد استخراجی و حذف بخشی از موم‌ها و ترکیبات چربی سطح الیاف نسبت داده شود. این تغییرات سبب افزایش زبری و فعال‌سازی سطح الیاف شده و زمینه‌ساز ایجاد پیوندهای قوی‌تر با ماتریس سیمانی گردید. در ناحیه $1240-1250\ cm^{-1}$، در مقابل، باند جذبی در حدود $1030\ cm^{-1}$ که به ارتعاش کششی پیوندهای C–O–C در سلولز مربوط می‌شود، پایدار ماند یا اندکی افزایش یافت. این تغییر نشان‌دهنده افزایش سهم نسبی سلولز در سطح الیاف پس از تیمار، با حذف اجزای ناخالصی‌ها و مواد استخراجی است؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های Rowell و همکاران، (۲۰۱۳) و Bledzki and Gassan و همکاران، (۱۹۹۹)، همسو است [۲۵، ۲۶]. به‌طور کلی، نتایج FTIR نشان داد که تیمار قلیایی با NaOH منجر به حذف مواد قابل استخراج، پاک‌سازی سطح از مواد مزاحم و استخراجی، کاهش گروه‌های آب‌دوست و فراهم‌سازی شرایط برای تعامل بهتر الیاف با سیمان شده است. این تغییرات موجب افزایش درصد نسبی سلولز، بهبود نظم بلوری، کاهش گروه‌های عاملی مزاحم و در نهایت ارتقای سازگاری و چسبندگی بین الیاف تیمار شده و ماتریس سیمانی گردید. این نتایج با مطالعات Wei و همکاران (۲۰۰۰) و Kalia و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد که گزارش کرده‌اند تیمار قلیایی موجب اصلاح سطحی و بهبود سازگاری الیاف طبیعی با ماتریس معدنی می‌شود [۲۲، ۲۳]. علاوه بر این، حذف ترکیبات بازدارنده مانند قندهای محلول و اسیدهای آلی فرآیند هیدراتاسیون سیمان را تسهیل کرده و زمینه‌ساز بهبود خواص مکانیکی، کاهش جذب آب و واکشیدگی ضخامت در پانل‌های الیاف موز–سیمان می‌شود.



شکل ۴- نتایج طیف‌سنجی الیاف موز در حالت بدون تیمار و تحت تأثیر تیمار قلیایی

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها

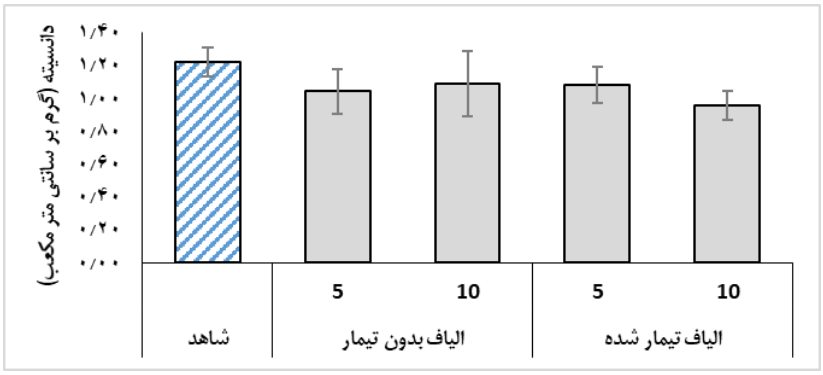
ویژگی	منبع تغییرات	مجموع مربعات	(df)	میانگین مربعات	F	(Sig.)
دانسیته	بین گروه‌ها	۰/۲۲۱	۴	۰/۰۵۵	۳/۱۹۹	*۰/۰۳۰
	درون گروه‌ها	۰/۴۳۱	۲۵	۰/۰۱۷		
	کل	۰/۶۵۲	۲۹			
جذب آب ۲ ساعت	بین گروه‌ها	۰۸۶/۱۲۳۹	۴	۷۷۲/۳۰۹	۳/۴۰۲	*۰/۰۲۴
	درون گروه‌ها	۰۸۳/۲۲۷۶	۲۵	۰۴۳/۹۱		
	کل	۱۷۰/۳۵۱۵	۲۹			
جذب آب ۲۴ ساعت	بین گروه‌ها	۷۲۵/۱۵۴۸	۴	۱۸۱/۳۸۷	۲/۸۶۵	*۰/۰۴۴
	درون گروه‌ها	۹۹۸/۳۳۷۸	۲۵	۱۶۰/۱۳۵		
	کل	۷۲۳/۴۹۲۷	۲۹			
واکشیدگی ضخامت ۲ ساعت	بین گروه‌ها	۴۸۴/۲	۴	۶۲۱/۰	۲/۴۹۸	۰/۰۶۸
	درون گروه‌ها	۲۱۵/۶	۲۵	۲۴۹/۰		
	کل	۶۹۹/۸	۲۹			
واکشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت	بین گروه‌ها	۶۴۰/۷	۴	۹۱۰/۱	۳/۱۰۳	*۰/۰۳۳
	درون گروه‌ها	۳۸۸/۱۵	۲۵	۶۱۶/۰		
	کل	۰۲۸/۲۳	۲۹			

مقادیر دارای علامت ستاره (*) در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار هستند.(Sig. < 0.05)

خواص فیزیکی پانل‌های الیاف موز- سیمان

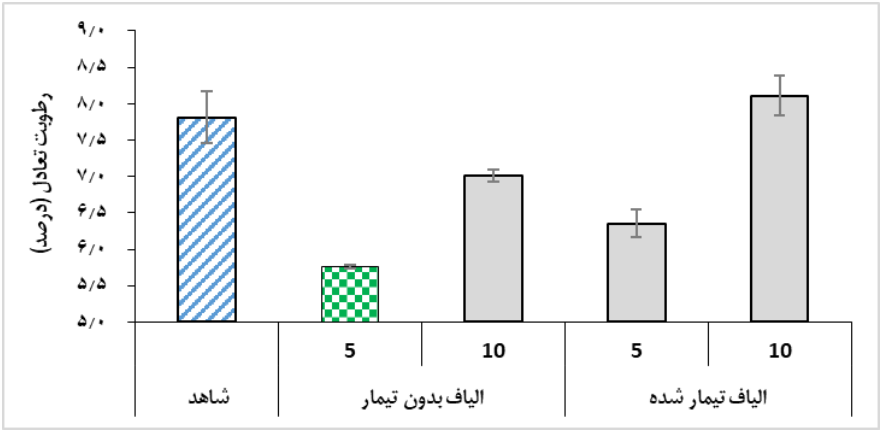
نتایج تجزیه واریانس آزمون‌های فیزیکی در جدول ۵ ارائه‌شده است.

شکل ۵، تأثیر نوع تیمار الیاف موز و درصد مصرف آن را بر دانسیته نمونه‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند نمونه شاهد (بدون الیاف) دارای بالاترین دانسیته (۱/۲۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بوده و از نظر آماری در گروه مجزا قرار گرفت. با افزودن الیاف موز، دانسیته تخته‌ها به‌طور کلی کاهش یافت که این موضوع ناشی از افزایش تخلخل داخلی و کاهش تراکم‌پذیری ماتریس سیمانی در حضور فاز آلی است. با این حال، اثر تیمار سطحی قلیایی قابل توجه بود؛ به‌ویژه در سطح ۵ درصد الیاف تیمار شده، دانسیته افزایش یافت و به مقادیری نزدیک به نمونه شاهد رسید. این امر را می‌توان به حذف مواد استخراجی و موم‌های سطحی در اثر تیمار قلیایی نسبت داد که موجب افزایش زبری سطحی و بهبود نفوذپذیری الیاف شده و به تبع آن موجب نفوذ دوغاب سیمان در الیاف و در نتیجه افزایش تراکم‌پذیری تخته‌ها می‌شود [۲۷، ۲۸]. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تیمار قلیایی الیاف موز اثر معنی‌داری بر دانسیته نمونه‌ها دارد. مطابق نتایج تحلیل واریانس، تفاوت آماری معنی‌داری بین گروه‌ها مشاهده شد که نشان از تأثیر تیمار سطحی الیاف بر تراکم نهایی تخته دارد. از منظر مکانیزمی، تیمار قلیایی با کاهش آب‌دوستی و فعال‌سازی گروه‌های عاملی سطح الیاف، شرایط مناسب‌تری برای پیوند با فاز معدنی فراهم می‌آورد [۲۶، ۲۲]. این امر نه‌تنها منجر به بهبود دانسیته می‌شود بلکه تأثیر مثبتی بر سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی دارد؛ زیرا دانسیته بالاتر معمولاً با کاهش جذب آب و واکشیدگی ضخامت همراه است [۲۹]، بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از درصد بهینه الیاف تیمار شده (مانند ۵ درصد) نه‌تنها موجب افت تراکم نمی‌شود بلکه سبب ارتقای کیفیت تخته‌ها نیز خواهد شد. یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین روی سایر الیاف طبیعی همچون کنف، جوت و نارگیل هم‌راستا است که همگی نشان داده‌اند تیمار قلیایی الیاف موجب بهبود پیوند الیاف–ماتریس و ارتقای خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها می‌شود [۲۵].



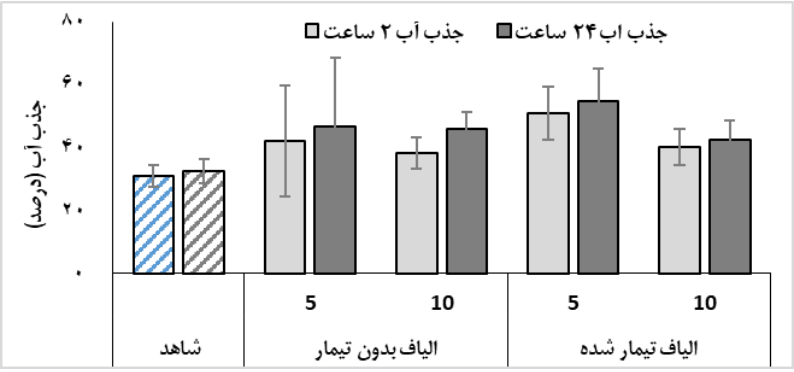
شکل ۵- تأثیر نوع تیمار الیاف موز و درصد مصرف آن بر دانسیته تخته‌های چوب سیمان

تأثیر نوع تیمار الیاف موز و درصد مصرف آن بر رطوبت تعادل پانل‌های الیاف موز- سیمان در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که نمونه شاهد (بدون الیاف) بالاترین میزان رطوبت تعادل را با میانگین حدود ۸ درصد دارد که بیانگر تمایل بالای این نمونه به جذب رطوبت محیطی است. افزودن ۵ درصد الیاف موز خام موجب کاهش چشمگیر رطوبت تعادل به حدود ۵/۵ درصد شد که می‌تواند به افزایش تراکم نسبی و کاهش تخلخل در حضور درصد پایین الیاف نسبت داده شود. با این حال، در تیمار ۱۰ درصد الیاف خام، رطوبت تعادل مجدداً افزایش یافت (حدود ۷ درصد) که نشان‌دهنده افزایش گروه‌های آب‌دوست و تخلخل بیشتر در درصدهای بالاتری از الیاف است. علاوه بر این در تخته‌های ساخته شده با الیاف تیمار شده (باNaOH) ، الگوی مشابهی مشاهده شد. در تیمار ۵ درصد، رطوبت تعادل حدود ۶/۳ درصد بود که نسبت به الیاف خام اندکی بیشتر اما همچنان پایین‌تر از نمونه شاهد بود. در سطح ۱۰ درصد الیاف تیمارشده، رطوبت تعادل به بیش از ۸ درصد رسید که بالاترین مقدار در بین تمامی تیمارها محسوب می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که در درصدهای بالای الیاف، اثر افزایش سطح تماس آلی و تخلخل غالب شده و منجر به افزایش مجدد جذب رطوبت می‌شود [۲۳، ۲۴]. این نتایج به‌خوبی نشان می‌دهد که اثر نوع و درصد الیاف بر رطوبت تعادل غیرخطی است. در سطوح پایین (۵ درصد)، افزودن الیاف، به‌ویژه تیمارشده، موجب بهبود رفتار رطوبتی و کاهش جذب رطوبت می‌شود. در حالی‌که در درصدهای بالاتر (۱۰ درصد)، افزایش میزان فاز آلی و ایجاد حفرات داخلی موجب کاهش کارایی تیمار و افزایش رطوبت تعادل می‌گردد؛ بنابراین، انتخاب درصد بهینه همراه با اصلاح سطحی مناسب، برای بهبود پایداری ابعادی و دوام تخته‌های چوب‌سیمان ضروری است. این الگو با یافته‌های مطالعات مشابه در مورد الیاف گیاهی مختلف مطابقت دارد که همگی بر نقش حیاتی درصد بهینه و تیمار سطحی در کنترل رطوبت تعادل تأکید داشته‌اند [۲۲، ۲۵].

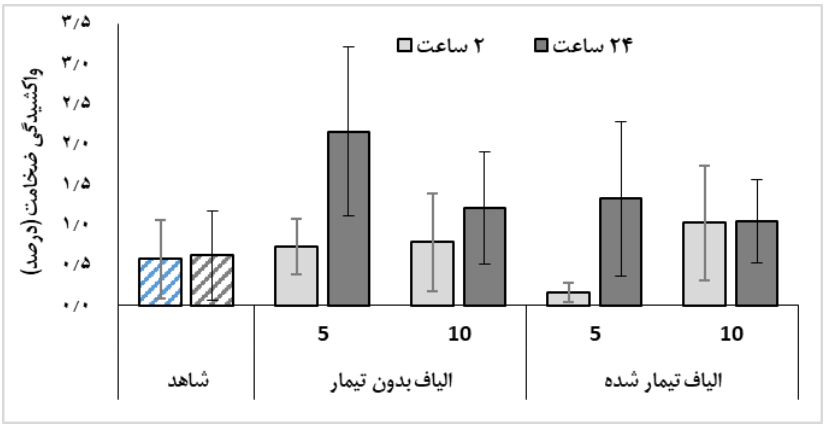


شکل ۶- تأثیر نوع تیمار الیاف موز و درصد مصرف آن بر رطوبت تعادل تخته‌های چوب‌سیمان

نتایج جذب آب و واکشیدگی ضخامت تخته‌های چوب-سیمان حاوی الیاف موز با و بدون تیمار (بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری) به ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۸ آمده است. افزودن الیاف طبیعی به تخته‌های چوب‌سیمان به‌طور کلی موجب افزایش قابلیت جذب آب می‌شود، زیرا گروه‌های عاملی هیدروفیل موجود در ساختار لیگنوسلولزی الیاف تمایل زیادی به تشکیل پیوند هیدروژنی با مولکول‌های آب دارند. در این پژوهش، مقایسه نمونه‌های شاهد (بدون الیاف)، الیاف خام و الیاف تیمار شده نشان داد که افزودن الیاف خام موجب افزایش معنی‌دار جذب آب در هر دو بازه زمانی ۲ و ۲۴ ساعت شد. نمونه‌های دارای ۱۰ درصد الیاف خام بیشترین میزان جذب آب را داشتند (بیش از ۵۰ درصد در ۲ ساعت و ۵۴ درصد در ۲۴ ساعت)، در حالی که نمونه‌های حاوی ۵ درصد الیاف تیمارشده کمترین مقادیر جذب آب هر دو زمان را نشان دادند (۳۰/۹۵ درصد برای ۲ ساعت و ۳۲/۳۷ درصد برای ۲۴ ساعت). این تفاوت نشان می‌دهد که تیمار قلیایی سدیم هیدروکسید با حذف همی‌سلولز و بخشی از لیگنین، میزان گروه‌های فعال هیدروفیل را کاهش داده و موجب بهبود پایداری رطوبتی الیاف و کامپوزیت نهایی شده است [۲۷، ۲۸]. علاوه بر اصلاح شیمیایی، افزایش دانسیته در نمونه‌های تیمارشده نیز عاملی مؤثر بر کاهش جذب آب بود، چراکه ساختار متراکم‌تر مانع از نفوذ آب به حفرات داخلی شد [۲۹]. در مقابل، الیاف خام به دلیل ناسازگاری با ماتریس سیمانی، ایجاد حفرات و مرزهای ضعیف در سطح تماس، نفوذپذیری بیشتری به آب داشتند. این نتایج با مطالعات پیشین روی سایر الیاف طبیعی از جمله جوت، کنف و نارگیل هم‌راستا است که نشان داده‌اند تیمار قلیایی به‌طور قابل توجهی میزان جذب آب کامپوزیت‌های پایه سیمانی را کاهش می‌دهد [۲۲، ۲۵]. واکشیدگی ضخامت شاخصی کلیدی برای ارزیابی پایداری ابعادی کامپوزیت‌های چوب‌سیمان است و ارتباط نزدیکی با جذب آب دارد. نتایج نشان داد که در دوره ۲ ساعته اختلاف معنی‌داری میان مقدار واکشیدگی ضخامت تخته‌های ساخته شده (تیمارها) وجود نداشت، اما پس از ۲۴ ساعت اختلاف بین مقادیر واکشیدگی ضخامت معنی‌دار است. بیشترین واکشیدگی ضخامت مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد الیاف خام بود (برابر ۲/۱۵ درصد)، در حالی که کمترین مقدار در نمونه‌های دارای ۱۰ درصد الیاف تیمارشده مشاهده شد (برابر ۰/۶ درصد). این یافته بیانگر آن است که تیمار قلیایی با کاهش محتوای استخراجی و موم‌ها سطح فعال‌تری برای پیوند با سیمان ایجاد کرده و در نتیجه مانع از نفوذ بیش از حد آب و تورم ابعادی الیاف شده است [۲۴، ۲۸]. علاوه بر این، افزایش دانسیته در نمونه‌های تیمارشده نیز به کاهش واکشیدگی کمک کرد؛ زیرا ساختار متراکم‌تر، فضاهای خالی کمتری برای جذب و انبساط آب باقی گذاشت. از سوی دیگر، الیاف خام به دلیل دارا بودن سطح ناسازگار و حفظ خاصیت آب‌دوستی، موجب افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش واکشیدگی ضخامت شدند. این نتایج همسو با تحقیقات Rowellو همکاران (۲۰۱۳) است که نشان دادند اصلاح سطح الیاف طبیعی به‌ویژه از طریق تیمار قلیایی، نقش کلیدی در کاهش تورم ابعادی و بهبود دوام کامپوزیت‌های پایه سیمانی دارد.



شکل۷- مقادیر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت در تخته‌های چوب‌سیمان حاوی الیاف موز تیمار شده و نشده

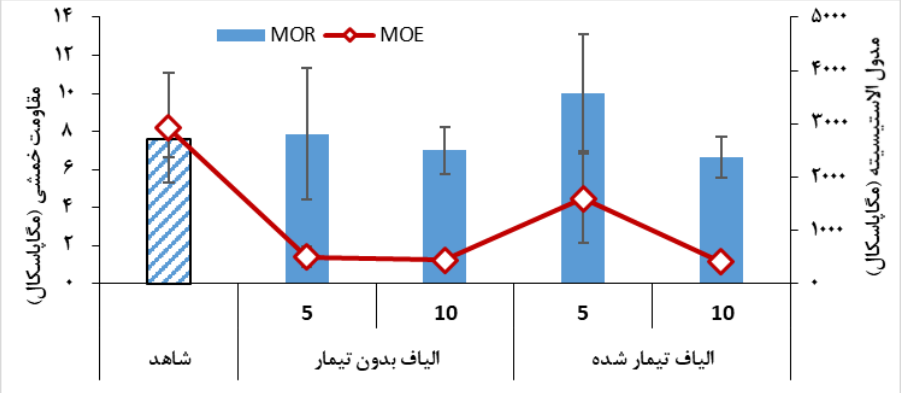


شکل ۸- مقادیر واکشیدگی ضخامت تخته‌های چوب‌سیمان تحت تأثیر نوع و درصد الیاف موز در بازه‌های زمانی ۲ و ۲۴ ساعت

خواص مکانیکی پانل‌های الیاف موز- سیمان

مقاومت خمشی به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های چوب–سیمان، نشان‌دهنده توانایی ماده در تحمل بارهای خمشی است. نتایج نشان دادند که افزودن الیاف موز تأثیر قابل‌توجهی بر MOR دارد و این اثر به نوع و درصد الیاف وابسته است (شکل ۹). بیشترین مقدار MOR در پانل‌های حاوی ۵٪ الیاف تیمار شده با NaOH ثبت شد (۱۰/۰۳ مگاپاسکال) که به‌طور معنی‌داری بالاتر از نمونه شاهد (۷/۶۰ مگاپاسکال) بود. این بهبود مقاومت ناشی از افزایش چسبندگی بین سطحی در نتیجه تیمار قلیایی است؛ چراکه حذف ناخالصی‌ها و موم‌های سطحی موجب زبری بیشتر، کاهش آب‌دوستی و افزایش سطح تماس مؤثر میان الیاف و خمیر سیمان می‌شود [۲۷، ۲۸]. چنین اصلاح سطحی موجب انتقال بهتر تنش، کاهش تمرکز تنش و بهبود انسجام ساختاری در ناحیه بین سطحی شده است [۲۶]. در مقابل، نمونه‌های حاوی الیاف خام یا درصد بالاتر الیاف (۱۰ درصد)، به‌ویژه بدون تیمار، کاهش قابل‌توجهی در MOR نشان دادند. این کاهش عمدتاً ناشی از پراکندگی نامناسب الیاف، تجمع و افزایش تخلخل داخلی است که منجر به ایجاد نواحی ضعیف در ماتریس سیمان می‌شود [۲۹]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که MORبه‌شدت تحت تأثیر هم میزان الیاف و هم کیفیت پیوند بین سطحی قرار دارد و وجود درصد بهینه همراه با اصلاح سطحی می‌تواند به حداکثر رساندن این ویژگی کمک کند. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده (شکل ۹)، تغییرات مدول الاستیسیته (MOE) در پانل‌های الیاف موز–سیمان به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع الیاف (تیمار شده و بدون تیمار) و درصد مصرف آن‌ها قرار گرفت. نمونه شاهد (فاقد الیاف) بیشترین مقدار مدول الاستیسیته خمشی را نشان داد که بیانگر نقش سیمان خالص در ایجاد ساختاری سخت و نسبتاً ترد است. در مقابل، افزودن الیاف خام در سطوح ۵ و ۱۰ درصد منجر به کاهش چشمگیر MOE شد. این کاهش را می‌توان به پراکندگی نامناسب الیاف (شکل۱۰)، وجود ترکیبات قندی و پکتینی سطحی و اختلال در واکنش هیدراتاسیون سیمان نسبت داد؛ عواملی که پیش‌تر نیز توسط Marques و همکاران (۲۰۱۶) و Carrara و همکاران (۲۰۱۷) به‌عنوان مهم‌ترین موانع در تولید کامپوزیت‌های چوب–سیمان گزارش شده‌اند [۳۰، ۳۱]. با این حال، تیمار قلیایی الیاف موز اثر مثبتی بر خواص خمشی داشت. نمونه‌های حاوی ۵ درصد الیاف تیمار شده افزایش قابل توجهی در MOE نسبت به الیاف خام نشان دادند و عملکردی نزدیک به شاهد داشتند. این موضوع نشان‌دهنده نقش تیمار در افزایش زبری سطح و در نتیجه بهبود چسبندگی الیاف–ماتریس است؛ مشابه یافته‌های Olofin و همکاران (۲۰۲۵) که نشان دادند اصلاح سطحی الیاف طبیعی، انتقال تنش در مرز مشترک را بهبود می‌بخشد. در مقابل، استفاده از ۱۰ درصد الیاف تیمار شده باعث افت دوباره MOE شد. این امر احتمالاً ناشی از تجمع بیش‌ازحد الیاف، افزایش حفرات داخلی و محدود شدن واکنش هیدراتاسیون سیمان است [۳۲]. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف خام بدون پیش تیمار تأثیر منفی بر خواص مکانیکی دارد، اما تیمار

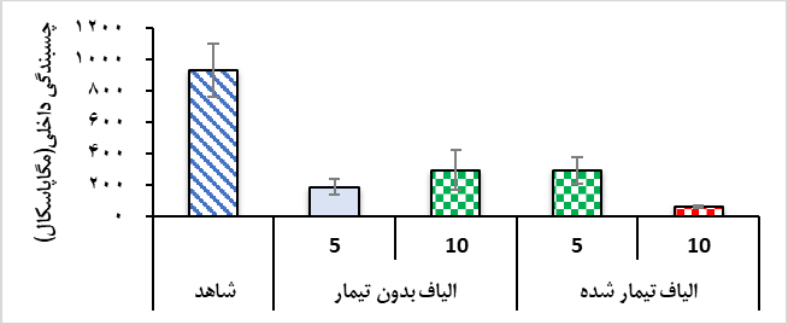
قلیایی در سطح بهینه (۵ درصد) موجب بهبود مدول الاستیسیته و عملکرد خمشی می‌شود. یافته‌های حاضر با مطالعات مشابه روی سایر الیاف طبیعی مانند بامبو و جوت هم‌راستا است که نشان داده‌اند تیمار قلیایی و مصرف محدود الیاف می‌تواند تعادل مناسبی میان انعطاف‌پذیری و صلبیت فراهم آورد. از منظر صنعتی، این نتایج اهمیت انتخاب شرایط بهینه پیش تیمار و میزان مصرف الیاف را در توسعه پانل‌های سیمانی زیست‌پایه پایدار و دارای خواص مکانیکی مطلوب برجسته می‌کند.



شکل ۹-مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته خمشی چوب‌سیمان تحت تأثیر نوع و درصد الیاف موز

شکل ۱۰- پراکندگی نامناسب الیاف قابل مشاهده در ضخامت نمونه‌ها

نتایج بررسی چسبندگی داخلی (IB) تخته‌های حاوی الیاف موز- سیمان که در شکل ۱۱ آمده است، نشان داد که نوع و تیمار الیاف موز نقش تعیین‌کننده‌ای در انسجام درونی و مقاومت کششی عمود بر سطح دارند. نمونه‌های حاوی الیاف خام به دلیل حضور ترکیبات بازدارنده نظیر مواد قابل استخراج و موم‌ها و نیز ماهیت آب‌دوست سطح، پیوند ضعیف‌تری با ماتریس سیمانی ایجاد کرده و به دلیل افزایش تخلخل داخلی، کمترین مقادیر IB را ثبت کردند؛ این امر با گزارش‌های پیشین در مورد سایر الیاف لیگنوسلولزی هم‌راستا است [۳۳]. در مقابل، تیمار قلیایی با NaOH موجب حذف بخشی از ترکیبات غیر سلولزی، افزایش زبری و فعال‌سازی گروه‌های عاملی سطحی شده و بدین ترتیب پیوند شیمیایی و مکانیکی الیاف با خمیر سیمان را تقویت نمود. علاوه بر این، افزایش دانسیته و کاهش تخلخل ساختاری در نمونه‌های تیمار شده، امکان نفوذ بهتر خمیر سیمان به بافت سلولی و درنتیجه ارتقای چشمگیر چسبندگی داخلی را فراهم ساخت [۲۸، ۳۴]. بیشترین IB در نمونه‌های حاوی ۵ درصد الیاف تیمار شده مشاهده شد که نشان‌دهنده شرایط بهینه در تعادل میان تراکم ساختاری و پیوند بین سطحی بود، درحالی‌که درصدهای بالاتر الیاف به دلیل تجمع و ایجاد حفرات داخلی موجب کاهش نسبی این ویژگی گردید. این یافته‌ها با نتایج مشابه در مورد الیاف کنف، جوت و نارگیل همخوانی دارد و بر نقش کلیدی تیمار قلیایی در بهبود چسبندگی داخلی و ارتقای دوام کامپوزیت‌های چوب–سیمان تأکید می‌کند [۲۲، ۲۵].



شکل۱۱- چسبندگی داخلی چوب‌سیمان تحت تأثیر نوع و درصد الیاف موز

مقاومت به آتش پانل‌های الیاف موز- سیمان

نتایج آزمون مقاومت به آتش (جدول ۶) نشان داد که تخته‌های چوب–سیمان حاوی الیاف موز، حتی با وجود ماهیت آتش‌گیر الیاف طبیعی، رفتار حرارتی مطلوبی داشته و از ایمنی بالایی در برابر حریق برخوردارند. بررسی دوام شعله و دوام گدازه نشان داد که در تمامی تیمارها مقدار این شاخص‌ها صفر بوده است؛ به عبارت دیگر، نمونه‌ها پس از تماس اولیه با شعله، به‌سرعت خاموش شده و هیچ‌گونه گدازه‌ای از آن‌ها جاری نشده است. این ویژگی ناشی از نقش بازدارنده ماتریس سیمانی است که با ایجاد محیط قلیایی و تشکیل محصولات هیدراتاسیون، لایه‌ای محافظ در برابر حرارت و گازهای احتراقی به وجود می‌آورد و مانع از گسترش شعله در ساختار می‌شود [۳۵]. نتایج کاهش وزن نشان داد که افزودن الیاف موز، چه خام و چه تیمارشده، پایداری حرارتی تخته‌های چوب‌سیمان را نسبت به نمونه شاهد بهبود داد؛ به‌طوری‌که بیشترین کاهش وزن در نمونه شاهد (۵۲/۰ درصد) و کمترین در نمونه حاوی ۱۰ درصد الیاف خام (۰/۳۱ درصد) ثبت شد. در تیمارهای قلیایی مقادیر بین ۰/۳۶ تا ۰/۴۱ درصد قرار گرفت که اندکی بالاتر از الیاف خام بود. بااین‌حال، افزایش درصد الیاف (از ۵ به ۱۰ درصد) در هر دو حالت خام و تیمارشده موجب کاهش بیشتر کاهش وزن شد که نشان‌دهنده نقش مثبت شبکه متراکم‌تر الیاف در محدودسازی گازهای فرار و انتقال حرارت است. این نتایج حاکی از آن است که تیمار قلیایی اگرچه خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، اما در پایداری حرارتی نیازمند انتخاب درصد بهینه الیاف و احتمالاً استفاده از افزودنی‌های بازدارنده شعله است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین هم‌راستا هستند که نشان داده‌اند تیمار شیمیایی الیاف طبیعی موجب افزایش دمای تجزیه، کاهش تولید گازهای قابل احتراق و بهبود رفتار آتش پذیری کامپوزیت‌ها می‌شود [۳۶، ۳۷]. سازوکار اصلی این پدیده در کامپوزیت‌های چوب–سیمان به ترکیب دو فاز آلی و معدنی بازمی‌گردد؛ فاز آلی مستعد اشتعال است، اما حضور سیمان با خاصیت نسوزی و بازدارندگی شعله، اثرات منفی آن را به حداقل می‌رساند. تیمار قلیایی نیز با کاهش گروه‌های آب‌دوست و اجزای ناپایدار، انسجام ساختاری را افزایش داده و تخریب ناحیه بین سطحی را به تأخیر می‌اندازد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تخته‌های حاوی الیاف موز تیمار شده، به‌ویژه در درصد بهینه (۱۰ درصد)، از عملکرد حرارتی بالاتری برخوردار بوده و گزینه‌ای مناسب برای استفاده در صنایع ساختمانی در شرایط پرخطر حریق محسوب می‌شوند.

جدول ۶- نتایج آزمون مقاومت به آتش چوب‌سیمان تحت تأثیر نوع و درصد الیاف موز

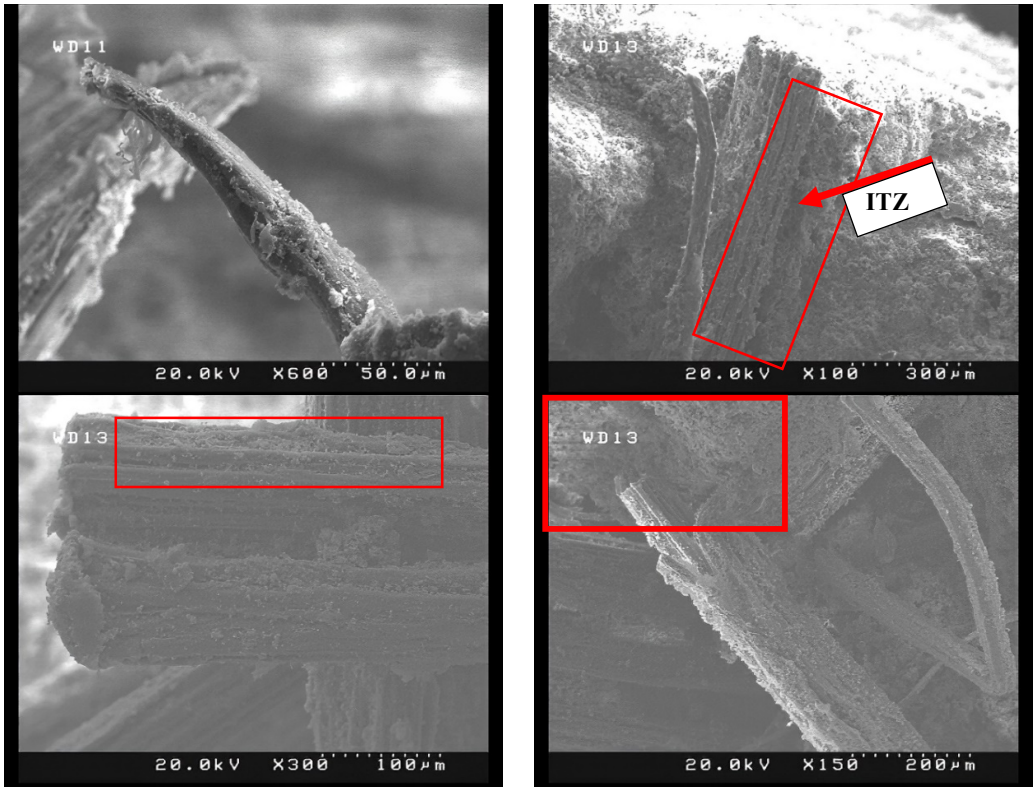
نوع تیمار الیاف	نسبت وزنی الیاف به سیمان (درصد)	دوام شعله (ثانیه)	دوام گدازه (ثانیه)	کاهش وزن (درصد)	سطح کربونیزه (درصد)
بدون تیمار (شاهد)	۰	۰	۰	۰/۵۲ ± ۰/۱۸	۴/۶۶
بدون تیمار	۵ به ۹۵	۰	۰	۰/۳۲ ± ۰/۱۴	۴/۶۶
	۱۰ به ۹۰	۰	۰	۰/۲۱ ± ۰/۰۲	۵
تیمار شده	۵ به ۹۵	۰	۰	۰/۴۱ ± ۰/۲۰	۶
	۱۰ به ۹۰	۰	۰	۰/۳۶ ± ۰/۱۰	۵

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی(FESEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۱۲) تفاوت آشکاری میان سطح الیاف موز در حالت بدون تیمار و تیمار شده با محلول قلیایی نشان می‌دهد. در نمونه‌های بدون تیمار (ردیف بالا)، سطح الیاف ناهموار و پوشیده از بقایای آلی، موم‌ها و ذرات استخراجی مشاهده شد. وجود این ترکیبات مانع از ایجاد تماس کامل و پیوند مؤثر میان الیاف و خمیر سیمان گردیده و مرز بین سطحی ضعیف همراه با حفرات فراوان ایجاد کرده است. در مقابل، تصاویر مربوط به الیاف تیمارشده با NaOH (ردیف پایین) حاکی از سطحی تمیزتر و یکنواخت‌تر است که ناشی از حذف بخشی از مواد استخراجی و ترکیبات سطحی ناپایدار می‌باشد. این تغییر موجب افزایش زبری نسبی سطح، بهبود نفوذپذیری دوغاب سیمان در خلل و فرج الیاف و در نتیجه تقویت قفل و بست مکانیکی گردید. علاوه بر این، تعامل نزدیک‌تر بین سیمان و سطح اصلاح‌شده الیاف، موجب افزایش تراکم مرز مشترک و کاهش تخلخل شد؛ عاملی که بهبود معنی‌دار در چسبندگی داخلی (IB) و خواص مکانیکی را توجیه می‌کند. بررسی دقیق تصاویر نشان می‌دهد که در نمونه‌های تیمارشده، خمیر سیمان به‌طور کامل‌تری در سطح و حفرات الیاف نفوذ کرده و تماس نزدیک‌تری ایجاد نموده است. این امر بیانگر تقویت ناحیه بین سطحی و کاهش تخلخل است. اگرچه مشاهده مستقیم منطقه انتقالی[1] (ITZ)در این بزرگ‌نمایی ممکن نیست، اما تراکم بالاتر و اتصال نزدیک‌تر میان سیمان و سطح اصلاح‌شده الیاف به‌طور غیرمستقیم مؤید بهبود کیفیت ITZ می‌باشد.

به‌طور کلی، مشاهدات FESEM تأیید می‌کند که تیمار قلیایی، نه از طریق حذف کامل اجزای ساختاری الیاف، بلکه با اصلاح سطحی و حذف ترکیبات مزاحم، سازگاری بین فاز آلی و معدنی را ارتقا داده است. این یافته‌ها همسو با گزارش‌های Kalia و همکاران (۲۰۱۱) و Wei و همکاران (۲۰۰۰) است که نشان داده‌اند اصلاح سطحی الیاف طبیعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود پیوند و کاهش تخلخل در کامپوزیت‌های پایه سیمانی دارد [۲۲].

[1] Interfacial Transition Zone



شکل ۱۲-تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (FESEM) از الیاف لیگنوسلولزی در ماتریس چوب‌سیمان (ردیف بالا) الیاف تیمار نشده، (ردیف پایین) الیاف تیمار شده با قلیا

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از الیاف موز، به‌ویژه پس از تیمار قلیایی با محلولNaOH ، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در بهبود خواص کامپوزیت‌های چوب–سیمان ایفای نقش کند. تیمار قلیایی با حذف ترکیبات بازدارنده نظیر ناخالصی‌ها، مواد استخراجی و موم‌های سطحی، موجب بهبود زبری سطح و افزایش گروه‌های عاملی فعال گردید که این امر چسبندگی بین فاز آلی (الیاف) و فاز معدنی (سیمان) را به‌صورت معنی-داری ارتقا داد. به‌طور خاص، در ترکیب‌هایی با ۵ درصد الیاف تیمارشده، خواص مکانیکی شامل MOR، MOEو چسبندگی داخلی به مقادیر مطلوبی دست یافتند که از لحاظ آماری نیز تفاوت معنی‌داری با سایر ترکیب‌ها داشتند. از منظر فیزیکی، بهبود در دانسیته، کاهش جذب آب، واکشیدگی ضخامت و رطوبت تعادل در ترکیب‌های حاوی الیاف تیمارشده مشاهده شد که بیانگر ارتقاء پایداری ابعادی و کاهش تمایل به جذب رطوبت محیطی است. بررسی‌های میکروسکوپی (FESEM) و طیف‌سنجی (FTIR) نیز تأییدگر بهبود تعامل بین سطحی و کاهش مؤلفه‌های ناهمساز در ساختار الیاف بودند. در آزمون مقاومت به آتش، تمامی نمونه‌ها از دوام شعله و گدازه قابل قبولی برخوردار بودند که نشان از نقش محافظتی ماتریس سیمانی دارد. این مسئله نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های تولیدی می‌توانند حتی در شرایط پر ریسک حرارتی نیز عملکرد مناسبی ارائه دهند. به‌طور کلی، نتایج تحقیق حاضر پتانسیل کاربرد صنعتی الیاف موز تیمار شده را در تولید پانل‌های چوب–سیمان با عملکرد بالا تأیید می‌کند و مسیر مناسبی برای استفاده از ضایعات کشاورزی در توسعه مصالح ساختمانی پایدار ارائه می‌دهد.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد و با حمایت‌های مالی و معنوی معاونت پژوهش و فناوری دانشکده منابع طبیعی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با شماره گرنت ۳۰۵۴۱/۶/۲۳ و همچنین شرکت ارمغان طبیعت مکران در قالب تفاهم‌نامه همکاری مشترک با دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی

دانشگاه تهران انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از این حمایت‌های ارزشمند اعلام می‌دارند.

منابع

[1] Raj, R. G. and Tan, W., 2018. Wood-cement composites: Properties, applications, and future trends. Journal of Composites for Construction, 22(6), 04018050.

[2] 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(1), p. 01350.

[3] Chaowana, P., 2013. Bamboo: an alternative raw material for wood and wood-based composites. Journal of Materials Science Research, 2(2), p. 90.

[4] Fernandes, F., Savastano Jr, H. and John, V. M., 2019. Alternative fibers for cement based composites. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 15, 34–39.

[5] Garcez, M. R., Oliari Garcez, E., Machado, A. O. and Gatto, D. A., 2016. Cement-wood composites: effects of wood species, particle treatments and mix proportion. International journal of composite materials, 6(1), pp. 1-8.

[6] IRNA News Agency, 2025. Statistical report on banana production in Iran. Available at: <https://www.irna.ir/> (Accessed: 15 March 2025). (In Persian).

[7] Monji, A. B., Iranmanesh, Y., Jaafari, A. and Goujani, H. J., 2020. Non-destructive derivation of biomass and carbon stock of wild pistachio (Pistacia atlantica Desf.). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 28(2), pp. 204-215. (In Persian).

[8] Venkateshwaran, N. and Elayaperumal, A., 2010. Banana fiber reinforced polymer composites-a review. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29(15), 2387-2396.

[9] Rouf, M. A., Alam, M. R., Belal, S. A., Ali, Y. and Rahman, M. Z., 2025. Mechanical and thermal performances of banana fiber–reinforced gypsum composites. International Journal of Polymer Science, 2025(1), 8120082.

[10] Dhivahar, P., 20250. Applications of Banana Fiber - A General Overview. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 13(3), pp. 583-588. DOI: 10.22214/ijraset.2025.67297

[11] Zhu, W. H., Tobias, B. C., Coutts, R. S. P. and Langfors, G., 1994. Air-cured banana-fibre-reinforced cement composites. Cement and concrete composites, 16(1), 3-8.

[12] Elbehiry, A., Elnawawy, O., Kassem, M., Zaher, A. and Mostafa, M., 2021. FEM evaluation of reinforced concrete beams by hybrid and banana fiber bars (BFB). Case Studies in Construction Materials, 14, e00479.

[13] Thanushan, K. and Sathiparan, N., 2022. Mechanical performance and durability of banana fibre and coconut coir reinforced cement stabilized soil blocks. Materialia, 21, 101309.

[14] Wazzan, A. A., 2006. The effect of surface treatment on the strength and adhesion characteristics of phoenix dactylifera-L (date palm) fibers. International Journal of Polymeric Materials, 55(7), 485-499.

[15] Mishra, S. and Chaudhary, V., 2021. Chemical treatment of reinforced fibers used for bio composite: a review. Advances in Engineering Materials: Select Proceedings of FLAME 2020, 137-147.

[16] Siriput, P., Suwan, T., Thongchua, H., Thongchua, G., Thammapradit, Y. and Jitsakulchok, S., 2023. Preliminary study of natural fibers with various treatment processes on properties of fiber-reinforced cement. In BIO Web of Conferences, 62, p. 02003). EDP Sciences.

[17] AL-Zubaidi, A. B., 2018. Effect of natural fibers on mechanical properties of green cement mortar. In AIP Conference Proceedings, 1968(1), p. 020003.

[18] Lukmanova, L. V., Mukhametrakhimov, R. K. and Gilmanshin, I. R., 2019. Investigation of mechanical properties of fiber-cement board reinforced with cellulosic fibers. Conference Series: Materials Science and Engineering, 570(1), p. 012113.

[19] Shandilya, A., Gupta, A. and Verma, D., 2016. Banana fiber reinforcement and application in composites: a review. Green Approaches to Biocomposite Materials Science and Engineering, 201-227.

[20] Damnuirawat, P. and Waedolorh, R., 2023. The Local Wisdom to Innovative Utilization of Banana: Wall Panel Decoration from Banana Tree Fibers to Strengthen the Grassroots Economy of Ramdang Community, Singhanakhon District, Songkhla Province. Asian Journal of Arts and Culture, 23(2), pp. 262434-262434.

[21] Ntsie, O.D., Phiri, R. and Boonyasopon, P., 2025. Advancing sustainable infrastructure: natural fiber-reinforced composites in engineering. Discov Appl Sci, 7, 884. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07266-w

[22] Kalia, S., Kaith, B. S. and Kaur, I., 2011. Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review. Polymer Engineering & Science, 51(12), 2417–2430.

[23] Wei, J. and Meyer, C., 2000. The effects of fiber treatment on the properties of natural fiber reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 22(5), 393–399.

[24] Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A. and Chotard, T., 2008. Mechanical properties of hemp fibre reinforced

cement: Influence of the fibre/matrix interaction. Cement and Concrete Composites, 30(7), 539–544.

[25] Rowell, R. M., 2013. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press.

[26] Bledzki, A. K. and Gassan, J., 1999. Composites reinforced with cellulose based fibres. Progress in Polymer Science, 24(2), 221–274.

[27] Xie, Y., Hill, C. A., Xiao, Z., Militz, H. and Mai, C., 2010. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 41(7), 806-819

[28] Li, X., Tabil, L. G. and Panigrahi, S., 2007. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. Journal of Polymers and the Environment, 15(1), 25–33.

[29] Savastano Jr, H., Warden, P. G. and Coutts, R. S. P., 2005. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. Cement and Concrete Composites, 27(5), 583-592.

[30] Marques, M. L., Luzardo, F. H., Velasco, F. G., González, L. N., Silva, E. J. D. and Lima, W. G. D., 2016. Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20, 466-472.

[31] Carrara, P. and De Lorenzis, L., 2017. Consistent identification of the interfacial transition zone in simulated cement microstructures. Cement and Concrete Composites, 80, 224-234.

[32] Olofin, I., 2025. Nano-Cement Engineered Wood-boards (NCEW)-A review on wood-cement composite, materials, new technologies and future perspectives. Journal of Building Engineering, 99, 111571.

[33] Savastano Jr, H., Warden, P. G. and Coutts, R. S. P., 2003. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. Cement and Concrete Composites, 25(5), 535–544.

[34] Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M. M., Bali, A. and Quéneudec, M., 2009. Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling. Construction and Building Materials, 23(6), 2119–2126.

[35] Bourbigot, S., and Duquesne, S., 2008. Fire retardant polymers: Recent developments and opportunities. Journal of Materials Chemistry, 18(23), 2751–2765.

[36] John, M. J. and Thomas, S., 2008. Biofibres and biocomposites. Carbohydrate Polymers, 71(3), 343–364.

[37] Kazemi Najafi, S., Tajvidi, M., Hamidinia, E. and Azadfallah, M., 2013. Fire performance of natural fiber–polypropylene composites containing magnesium hydroxide. Journal of Thermoplastic Composite Materials,26(2), 179–194.