

Improvement of the Flexural Strength of Wood-Cement Boards by Glass Fiber Reinforced Polymer with Different Lengths

Arezoo Mousavi¹, Meraj Sharari², Akbar Rostampour Haftkhani^{3*},
Mohammad Arabi⁴, Mohammad Ahmadi⁵

1- MSc Student of Wood Science and Technology, department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate prof. of Wood Science and Technology, department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Corresponding author, Associate prof. of Wood Science and Technology, department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, *

Corresponding author, Email: Arostampour@uma.ac.ir

4- Assistant Professor of Wood Science and Technology, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

5- Associate prof. of Wood Science and Technology, department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: December 2025

Accepted: March 2026

Abstract

Problem definition and objectives: Cement-bonded wood composite are panel products which are made by combining wood chips, lignocellulosic fibers, or agricultural waste with mineral binders, often Portland cement. Due to the presence of cement, these products are brittle and fragile. Therefore, this study was aimed to improve the properties of cement-bonded wood composites by reinforcing them by glass fiber reinforced polymer (GFRP) with different lengths.

Methodology: In this study, the research variables included rice hull at two levels (5% and 10%), water-to-cement ratios at three levels (30:70, 35:65, and 40:60), and the length of the GFRP at four levels (0=without GFRP, 12 mm, 18 mm, and 24 mm). The amount of calcium chloride (3%), type of cement (Portland cement type 2), and percentage of GFRP (2.5%) were remained constant. In this study, 24 treatments and 6 replications were considered. Following the preparation of test samples, modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and density (D) were evaluated for the manufactured board.

Results: The results showed that in the manufactured specimens, the highest modulus of rupture (MOR) was related to boards made with 5% rice husk, 30% water to cement, and 18 mm GFRP length (4.510 MPa), and the lowest was related to boards made with 10% rice husk, 40% water to cement without GFRP (2.053 MPa). The results also indicated that the highest modulus of elasticity (MOE) was found in boards made with 5% rice hull, 30:70 water-to-cement, and a fiber length of 24 mm (3903.14 MPa), while the lowest was for boards made with 10% rice hull, 40:60 water-to-cement without GFRP (1045.59 MPa). Besides that, the highest density corresponded to boards made with 5% rice hull, 30:70 water-to-cement without GFRP (1.5686 g/cm³), while the lowest was for boards made with 10% rice hull, 40:60 water-to-cement, and a fiber length of 24 mm (0.9201 g/cm³). Also, as the amount of rice hull increased from 5% to 10%, the MOR, MOE,

and density decreased by 17.55%, 24.33%, and 20.88%, respectively. In the reinforced specimens, as the percentage of water-to-cement increased from 30% to 40%, the MOR, MOE, and density decreased by 41.21%, 46.35%, and 17.93%, respectively. Additionally, with the increase in fiber length from 0 (Without GFRP) to 24 mm, the MOR and MOE increased by 30.46% and 10.51%, respectively and the density decreased by 7.27%.

Conclusion: The study demonstrated that the incorporation of GFRP with various lengths into cement-bonded boards made from rice husk can significantly impact on the mechanical properties of them. Increasing the GFRP length up to 24 mm resulted in a remarkable improvement in both the modulus of rupture and the modulus of elasticity. The optimal production conditions for the wood–cement composite were achieved with 5% rice hull content, a water-to-cement ratio of 30%, and a fiber length of 24 mm. This study provides a practical strategy for enhancing the mechanical properties of wood–cement boards through the combination of synthetic and natural fibers, which can be valuable for researchers and professionals in the construction and composite materials industries.

Keywords: cement-bonded wood composites, rice hull, glass fiber reinforced polymer, bending strength.

بهبود مقاومت خمشی تخته‌های چوب سیمان با الیاف شیشه با طول‌های مختلف

آرزو موسوی^۱، معراج شرری^۲، اکبر رستم پور هفتخوانی^۳، محمد عربی^۴، محمد احمدی^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: Arostampour@uma.ac.ir

۴- استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۵- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: فروردین ۱۴۰۵

تاریخ دریافت: دی ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: چندان‌سازه‌های چوب سیمان محصولات صفحه‌ای هستند که از ترکیب خرده چوب‌ها، الیاف لیگنوسلولزی چوبی یا پسماندهای کشاورزی با اتصال‌دهنده‌های معدنی (اغلب سیمان پرتلند) ساخته می‌شوند. به دلیل استفاده از اتصال‌دهنده‌های معدنی مانند سیمان پرتلند، این محصولات معمولاً ترد و شکننده هستند. از این‌رو، این مطالعه با هدف بهبود خواص مکانیکی چندان‌سازه‌های چوب سیمان با استفاده از الیاف شیشه با طول‌های مختلف انجام شد. **مواد و روش‌ها:** در این مطالعه، متغیرهای پژوهش شامل پوسته شالی در دو سطح (۵ و ۱۰ درصد)، نسبت آب به سیمان در سه سطح (۷۰:۳۰، ۶۵:۳۵ و ۶۰:۴۰) و طول الیاف شیشه در چهار سطح (صفر (بدون الیاف شیشه)، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ میلی‌متر) بودند. مقدار کلرید کلسیم (۳ درصد)، نوع سیمان (سیمان پرتلند تیپ ۲)، درصد الیاف شیشه (۲/۵ درصد) به عنوان متغیرهای ثابت در نظر گرفته شدند. در مجموع ۲۴ تیمار مطالعه شد و برای هر تیمار ۶ تکرار در نظر گرفته شد. مدول گسیختگی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE) و دانسیته (D) برای تخته‌های ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

نتایج: نشان داد که در نمونه‌های ساخته شده، بیشترین مدول گسیختگی (MOR) مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد پوسته شالی، درصد آب به سیمان ۷۰:۳۰ و طول الیاف ۱۸ میلی‌متر (۴/۵۱۰ MPa) و کمترین آن مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۱۰ درصد پوسته شالی، درصد آب به سیمان ۶۰:۴۰ و طول الیاف صفر میلی‌متر (۲/۰۵۳ MPa) بود. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مدول الاستیسیته خمشی مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان ۷۰:۳۰ و طول الیاف شیشه ۲۴ میلی‌متر (۳۹۰۳/۱۴ مگاپاسکال) و کمترین مقدار آن مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۱۰ درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان ۶۰:۴۰ بدون الیاف شیشه (۱۰۴۵/۵۹ مگاپاسکال) بود. بیشترین مقدار دانسیته مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان ۷۰:۳۰ و بدون الیاف شیشه (۱/۵۶۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. با افزایش مقدار پوسته شالی از ۵ به ۱۰ درصد، مقدار MOR، MOE و دانسیته به ترتیب ۱۷/۵۵، ۲۴/۳۳ و ۲۰/۸۸ درصد کاهش یافت. با افزایش نسبت آب به سیمان از ۳۰ به ۴۰ درصد، مقدار MOR، MOE و دانسیته به ترتیب ۴۱/۲۱، ۴۶/۳۵ و ۱۷/۹۳ درصد کاهش یافت. با افزایش طول الیاف از صفر (نمونه‌های بدون الیاف) به ۲۴ میلی‌متر، مقدار MOR و MOE به ترتیب ۳۰/۴۶ و ۱۰/۵۱ درصد افزایش و دانسیته ۷/۲۷ درصد کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که استفاده از الیاف شیشه با طول‌های مختلف در تخته‌های چوب سیمان ساخته شده از پوسته شالی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی چندان‌سازه‌های چوب سیمان داشته است. به طوری که افزایش طول الیاف شیشه تا ۲۴ میلی‌متر سبب بهبود چشمگیر مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته شد. بهینه‌ترین شرایط تولید چندان‌سازه چوب سیمان با ۵ درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان ۷۰:۳۰ و طول الیاف ۲۴

میلی‌متر حاصل شد. این مطالعه راهکار مناسبی برای بهبود کیفیت خواص مکانیکی پانل‌های چوب و سیمان با استفاده از ترکیب الیاف مصنوعی و طبیعی ارائه می‌دهد و می‌تواند برای محققان و متخصصان صنعت ساختمان و مواد مرکب کاربردی باشد.

واژه‌های کلیدی: چندسازه چوب سیمان، پوسته شالی، الیاف شیشه، مقاومت خمشی.

مقدمه

رشد جمعیت و در پی آن نیاز فزاینده به منابع مختلف چوبی به همراه محدودیت و کمبود این منابع، محققان را به جستجوی راهکارهایی برای بهره‌برداری بهینه از این منابع سوق داده است. آن‌ها با به‌کارگیری روش‌های مختلف سعی در جلوگیری از مصرف غیر معقول و اتلاف انرژی دارند. یکی از این روش‌ها ساخت چندسازه-ها یا کامپوزیت‌ها می‌باشد که خواص آن‌ها را می‌توان با تغییر ترکیب چندسازه اصلاح کرده و بهبود بخشید. از سوی دیگر با ارتقاء فرهنگ مهندسی ساختمان، توجه ویژه‌ای به استفاده از مصالح سبک و در عین حال مقاوم معطوف شده است، تا بتوان در زمان کوتاهی ساختمان-های زیادی را احداث نمود [۱]. چوب سیمان یکی از انواع صفحات فشرده چوبی است که از اختلاط خرده چوب‌ها، الیاف لیگنوسلولزی چوبی یا ضایعات و پسماندهای کشاورزی که با مواد معدنی که در بیشتر موارد سیمان پرتلند است ترکیب و ساخته می‌شود [۲]. چوب سیمان در ساخت سقف‌های مسطح، دیوارهای صوتی، سنگ فرش و همچنین در ساخت پانل‌های عایق سازه‌ای در روش‌های مدرن ساخت و ساز و سیستم‌های مسکن ارزان قیمت در کشورهای در حال توسعه به دلیل هزینه نسبتاً پایین آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین صفحات فشرده چوب سیمان مزایایی دارند که سبب رقابت و برتری آنها از سایر صفحات چوب-پایه می‌شود. این محصولات ثبات ابعادی بالایی داشته و در برابر آتش و عوامل مخرب زیستی مقاوم می‌باشد و برخلاف تخته فیبر و تخته خرده چوب انتشار گاز فرمالدهید ندارند [۳]. توسعه فناوری این محصولات به مواد اولیه مورد نیاز، مانند چوب یا مواد لیگنوسلولزی و سیمان بستگی دارد. با توجه به محدودیت منابع جنگلی در کشورهایی مثل ایران، پسماند کشاورزی و مواد بازیافتی مانند کاغذ باطله و کارتن بازیافتی و پوسته شالی در برخی کاربردها جایگزین مناسبی برای

چوب هستند [۴]. پوسته شالی به عنوان یکی از ضایعات کشاورزی در مناطق زیرکشت برنج، دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در تولید تخته‌های چوب سیمان است. این ماده به دلیل ساختار سلولزی و سیلیسی خود، می‌تواند خواص مکانیکی و دوام تخته‌های چوب سیمان را بهبود بخشد. به‌کارگیری پوسته شالی در تولید این تخته‌ها نه تنها به کاهش ضایعات کشاورزی و حفظ محیط زیست کمک می‌کند، بلکه باعث کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری بیشتر می‌شود. از معایب تخته‌های چوب سیمان می‌توان به ضعف این صفحات در استحکام کششی، حد دوام خستگی و مقاومت به ضربه اشاره کرد [۵]. از اینرو، با افزودن الیاف تقویت کننده طبیعی و مصنوعی به آنها می‌توان ویژگی‌های مکانیکی این چندسازه را افزایش داده و بهبود بخشید. باتوجه به این نکته که چوب سیمان از سیمان و چوب تشکیل شده است و برای غلبه بر خاصیت تردی سیمان که باعث تردی چندسازه چوب-سیمان می‌شود، لازم است که از الیافی برای تقویت آن استفاده کنیم که از جمله آن می‌توان به الیاف بازیافتی، کاه گندم، پوشال و یا الیاف مصنوعی اشاره کرد. الیاف شیشه به دلیل مزایایی مانند استحکام کششی و سفتی بالا، خواص عایق عالی و مقاومت خوب در برابر آتش، رایج ترین الیاف تقویت کننده کامپوزیت‌های سیمانی است [۶]. ملات تقویت شده با الیاف شیشه یکی از مصالح ساختمانی جدید محسوب می‌شود. الیاف شیشه به طور قابل توجهی استحکام کششی و استحکام خمشی را بهبود می‌بخشد، اما تاثیر کمی بر مقاومت فشاری دارد [۷]. افزودن الیاف شیشه به کامپوزیت‌های سیمانی به عنوان یک عامل تقویت کننده با ترکیب مقدار کمی الیاف در ملات سیمان برای غلبه بر ضعف سنتی (استحکام کم کششی و شکنندگی) سیمان‌های معدنی، مد نظر قرار گرفته است. به طور کلی الیاف شیشه با ترکیبات مختلفی از اکسیدهای مختلف (به عنوان مثال، سیلیس، آلومینا و کلسیم) تولید می‌شوند. الیاف شیشه در برابر عوامل

برای ساخت تخته‌های چوب سیمان مزیت‌های زیادی دارد که می‌توان به تجدیدپذیری، دسترس‌پذیری، قیمت کم، کاهش وزن محصول نهایی، خواص عایق حرارتی و صوتی بهتر، مقاومت بالا در برابر آتش به دلیل وجود سیلیس، مقاومت بالا در برابر آفات و پوسیدگی، پایداری ابعادی اشاره کرد. علاوه بر این، تحقیقات متعددی در مورد افزودن الیاف مصنوعی از جمله الیاف پلی پروپیلن [۹-۱۱، ۱۴] و الیاف شیشه [۱۵، ۱۶] به سیمان برای بهبود خواص بتن انجام شده است، اما در مورد اضافه کردن آنها به چندسازه چوب سیمان تحقیقات اندکی وجود دارد. از اینرو، این تحقیق با هدف بهبود مقاومت و مدول خمشی تخته‌های چوب سیمان ساخته شده با پوسته شالی با افزودن الیاف شیشه با طول‌های مختلف انجام شد.

مواد و روش‌ها

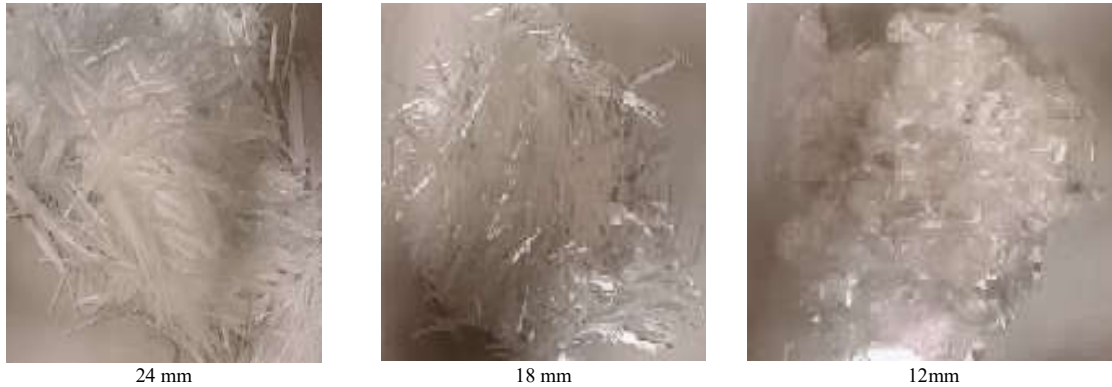
تهیه و آماده‌سازی مواد

پوسته شالی یک پسماند کشاورزی است که از پوشش بیرونی دانه‌های برنج در طی فرآیند برنج کوبی بدست می‌آید. پوسته شالی مورد استفاده در این تحقیق از یکی از کارخانه‌های برنج‌کوبی استان گیلان تهیه شد. این ماده به طور طبیعی و بدون عمل‌آوری خاصی برای ساخت چندسازه مورد استفاده قرار گرفت. الیاف شیشه (E-glass) به صورت پنبه‌ای و خرد شده (چاپت ۲) با طول-های ۱/۲، ۱/۸ و ۲/۴ سانتیمتر (شکل ۱) از شرکت پیشرو مبتکر پیوند (PMP) واقع در تهران تهیه شد. خواص مهندسی الیاف شیشه استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. سیمان مصرفی از محصولات شرکت آبیگ بوده که از مصالح فروشی‌های استان اردبیل تهیه شد. سیمان پرتلند نوع ۲، نوع اصلاح شده‌ای از سیمان استاندارد می‌باشد که برای افزایش مقاومت و کاهش حرارت هیدراسیون مصرف می‌گردد. ترکیبات سیمان مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

حرارتی- شیمیایی بسیار مقاومند، عملکرد مکانیکی بالایی دارند و به خوبی با مواد مختلف دیگر حتی پلیمرها پیوند می‌خورند و همچنین با داشتن قابلیت بازیافت بالا به طور گسترده برای تقویت بتن استفاده شده است [۸]. در تحقیقی دیگر مشاهده شد که اضافه کردن ۷/۱ درصد الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی چند سازه‌ها می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که پلی پروپیلن نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی چند سازه ایفا می‌کند [۹]. Bagherzadeh و همکاران (۲۰۱۱)، نشان دادند که افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن از ۰/۱ به ۰/۳ درصد، باعث افزایش مدول خمشی از ۹/۸MPa به ۱۰/۲MPa شد [۱۰]. Bagherzadeh و همکاران (۲۰۱۲)، تاثیر الیاف پلی پروپیلن و طول الیاف برای بهبود ویژگی‌های عملکرد چندسازه‌های سبک وزن را مورد مطالعه قرار دادند. الیاف در دو طول ۶ میلیمتر و ۱۲ میلیمتر و نسبت فیبر (۰/۱۵ درصد و ۰/۳۵ درصد) بر حسب وزن سیمان در طرح مخلوط استفاده شد. افزودن الیاف برای افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سبک LWC^۱ تقویت نشده در مقایسه با LWC^۱ تقویت شده با پلی پروپیلن نشان دادند که افزایش طول الیاف از ۶ به ۱۲ میلیمتر باعث افزایش مقاومت و مدول خمشی از ۲۳/۴MPa به ۳۱/۸MPa شد. همچنین افزایش طول الیاف استحکام کششی را ۲۷ درصد افزایش داد [۱۱]. ghofrani و همکاران (۲۰۱۵)، در تحقیقی با مطالعه کامپوزیت الیاف سیمان با استفاده از الیاف ساقه برنج و خاکستر پوسته برنج نشان دادند که مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تخته‌ها با افزایش درصد فیبر ساقه برنج افزایش یافت [۱۲]. Alwan و همکاران (۲۰۲۴)، با بررسی تاثیر استفاده از خاکستر پوسته شالی به عنوان ماده جایگزین در بتن بیان کردند که خاکستر پوسته شالی یک ماده جایگزین پوزولانی برای جایگزینی سیمان پرتلند معمولی برای افزایش دوام و کاهش خوردگی است. نتایج نشان داد که افزودن ذرات ریز خاکستر پوسته شالی به جای ذرات درشت آن مقادیر مقاومت خمشی، فشاری و کششی را افزایش داد [۱۳]. با مرور تحقیقات می‌توان دریافت که کاربرد پوسته شالی

² chopped fiber

¹ Lightweight aggregate concrete (LWC)



شکل ۱. الیاف شیشه به شکل‌های پنبه ای و سوزنی در طول‌های مختلف

جدول ۱. خواص مهندسی الیاف شیشه مورد استفاده در این تحقیق

ضخامت (mm)	وزن هر متر مربع (g/m ²)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۲۳۶	۶۰۰	۲۳۰۰	۹۰

جدول ۲. ترکیبات سیمان پرتلند ۲ تهیه شده از شرکت آبیگ

نام ماده	آهک	سیلیس	اکسید آلومنیوم	اکسید آهن	اکسید منیزیم	سولفات	اکسید سدیم یا پتاسیم
درصد تشکیل دهنده	۶۰-۶۷	۱۷-۲۵	۳-۸	۰/۵-۶	۰/۱-۴	۱-۳	۰/۵-۱/۳

کلرید کلسیم صنعتی به صورت جامد و به شکل پولکی از بازار خریداری شد و به میزان ۳ درصد به سیمان اضافه گردید. کلرید کلسیم پودری با جرم مولکولی ۱۴۷ و خلوص ۹۹ درصد محلول در آب و با فرمول شیمیایی $\text{CaCl}_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ می‌باشد.

تعریف متغیرهای آزمونی و ساخت نمونه‌ها

متغیرهای این پژوهش شامل پوسته شالی در دو سطح ۵ و ۱۰ درصد، دوغاب سیمان با سه سطح درصد آب به سیمان (۳۰:۷۰، ۴۰:۶۰، ۶۰:۴۰)، طول ماده تقویت کننده در ۴ سطح (۲۴، ۱۸، ۱۲، ۰ میلی‌متر) بودند. برای

گیرایی سیمان نیز از کلرید کلسیم به میزان ۳ درصد وزن خشک سیمان استفاده شد. برای ساخت تخته قالب‌های چوبی با ضخامت ۱۶ میلی‌متر ساخته شد. با توجه به عوامل متغیر، جرم مواد اولیه محاسبه شد. لایه ریزی مواد به صورت دستی انجام گرفت و کیک تشکیل شده در قالب چوبی ریخته شد. سپس سطح کیک در داخل قالب به وسیله ماله فلزی صاف شد. تخته‌ها پس از سپری شدن ۳۰ روز در شرایط آزمایشگاهی از داخل قالب چوبی خارج شدند. نمونه‌های آزمونی براساس استاندارد مورد نظر بریده شدند و در داخل محیط کارگاهی اندازه‌گیری شدند (شکل ۲).



شکل ۲. نمونه‌های ساخته شده تخته‌های چوب سیمان

استفاده از نرم افزار SPSS ورژن ۲۷ انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس و تاثیر نوع و نسبت هر یک از متغیرها مانند درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان و درصد طول الیاف بر میانگین مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و دانسیته کامپوزیت چوب سیمان در جدول ۳ ارائه شده است. همان طوریکه قابل مشاهده است، اثر مستقل متغیرهای درصد پوسته شالی و نسبت آب به سیمان بر مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و دانسیته، معنی دار بوده در حالیکه، تغییر طول الیاف، تنها بر مقاومت خمشی تاثیر معنی داری داشته است. اثر متقابل درصد پوسته شالی $\times$ درصد آب به سیمان بجز دانسیته تخته ها در باقی موارد، معنی دار می باشد. در خصوص اثر متقابل پوسته شالی $\times$ طول الیاف در هیچ یک از متغیرها، اثر معنی داری مشاهده نشد. این در حالی است که اثر متقابل درصد آب سیمان $\times$ طول الیاف، فقط بر مقاومت خمشی، تاثیر معنی داری داشته است و نهایتاً اثر متقابل سه فاکتور درصد پوسته شالی $\times$ درصد آب به سیمان $\times$ طول الیاف، اثر معنی داری بر MOR، MOE و دانسیته تخته ها نداشت.

آزمون نمونه ها

آزمایش اندازه گیری مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) نمونه های آزمونی بر اساس استاندارد EN 310 انجام شد. این آزمایش با دستگاه Hounsfield مدل 0308 و با سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد نمونه های آزمونی ۲۸۰، ۵۰ و ۱۶ میلی متر (به ترتیب طول، پهنا و ضخامت) بود و نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع ۱۶ در نظر گرفته شد.

تجزیه و تحلیل داده ها

در این مطالعه، متغیرهای پژوهش شامل پوسته شالی در دو سطح (۵ و ۱۰ درصد نسبت به وزن کل ترکیبات)، نسبت آب به وزن خشک سیمان در سه سطح (۶۰:۴۰، ۷۰:۳۰ و ۶۵:۳۵) و طول الیاف شیشه در چهار سطح (صفر (بدون الیاف شیشه)، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ میلی متر) و مقدار آن ۲/۵ درصد کل ترکیبات در نظر گرفته شدند. در مجموع ۲۴ تیمار مطالعه شد و برای هر تیمار ۶ تکرار در نظر گرفته شد. طرح آزمونی مورد استفاده در این تحقیق آزمون فاکتوریل بود و برای مقایسه میانگین ها از آزمون چند دامنه ای دانکن استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده ها با

جدول ۳. جدول تجزیه واریانس متغیرهای تیمار بر مقاومت ها و دانسیته کامپوزیت چوب سیمان

مدول گسیختگی (MOR)		مدول الاستیسیته (MOE)		دانسیته (D)	
مقدار F	Sig.	مقدار F	Sig.	مقدار F	Sig.
۸/۷۷۵	۰/۰۰۴**	۱۶/۴۱۰	۰/۰۰۰**	۱۸۸/۰۵۲	۰/۰۰۰**
۲۴/۵۳۵	۰/۰۰۰**	۲۹/۴۱	۰/۰۰۰**	۴۵/۱۴۲	۰/۰۰۰**
۳/۳۵۰	۰/۰۲۱*	۱/۱۰۴	۰/۳۵۰ ns	۲/۲۲۶	ns/۰/۰۸۴
۳/۰۸۲	۰/۰۴۹*	۵/۲۱۰	۰/۰۰۷**	۱/۴۹۳	ns/۰/۲۲۹
۰/۷۴۰	۰/۰۵۳ ns	۱/۴۲۵	۰/۲۳۹ ns	۰/۵۱۰	ns/۰/۶۶۷
۲/۲۲۰	۰/۰۴۵*	۱/۴۹۲	۰/۱۸۶ ns	۰/۵۲۲	ns/۰/۷۹۱
۰/۶۱۷	۰/۷۱۶ ns	۰/۴۹۶	۰/۸۱۰ ns	۰/۷۳۹	ns/۰/۶۱۹
* معنی داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد،		** معنی داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد،		ns: عدم معنی داری	

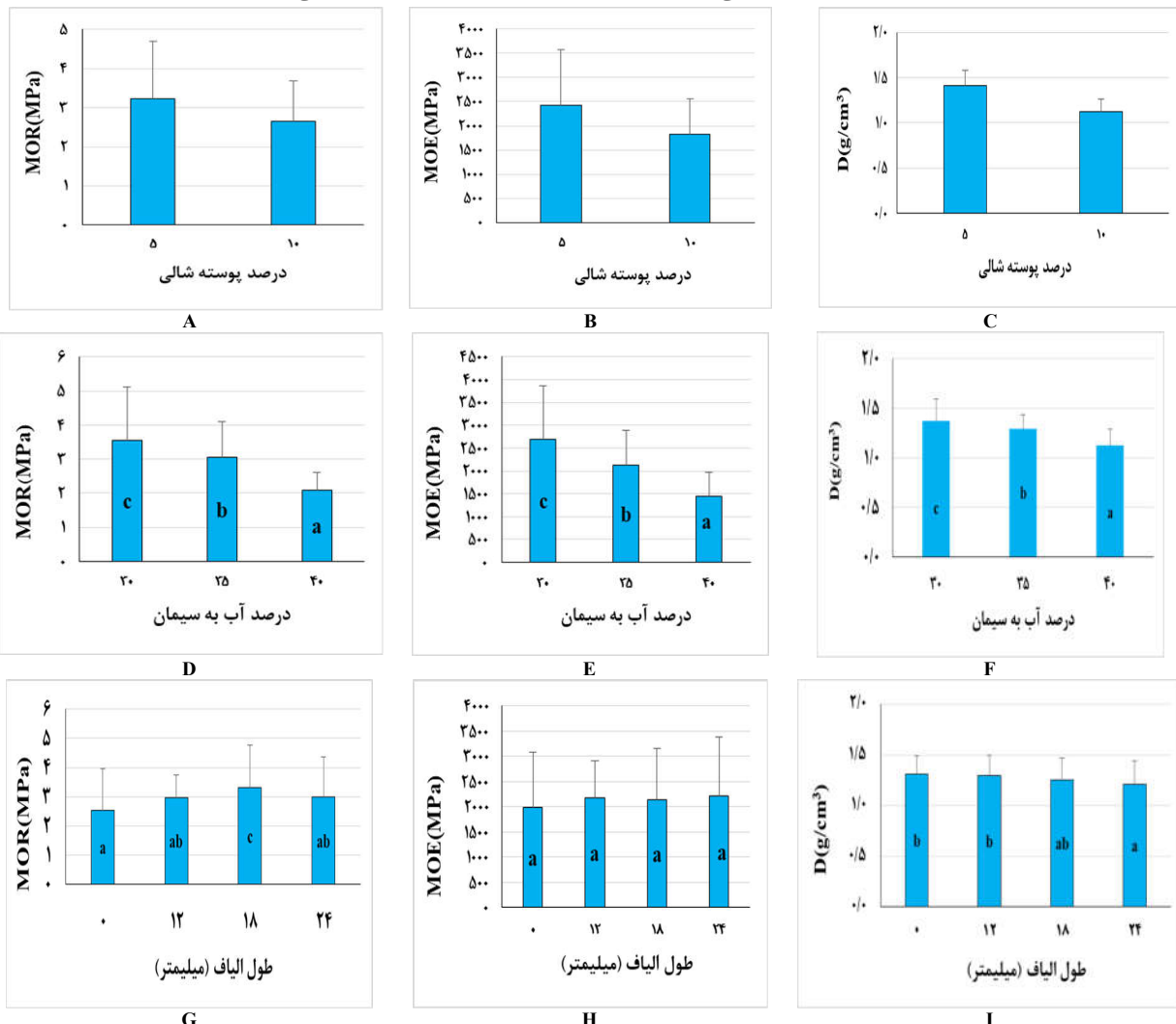
این متغیرها با افزایش درصد پوسته شالی از ۵ درصد به ۱۰ درصد می باشد. به نحوی که مدول گسیختگی از ۳/۲۲۱ به ۲/۶۵۶ مگاپاسکال (۱۷/۵۳ درصد)، مدول الاستیسیته از ۲۴۱۷/۹۵ به ۱۸۲۹/۵۵ مگاپاسکال (۲۴/۳۳ درصد) و دانسیته از ۱/۴۰۵۶ به ۱/۱۲۳۲ گرم بر سانتیمتر مکعب (۲۰/۰۹ درصد) کاهش داشته است.

اثر مستقل درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان و درصد طول الیاف بر مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و دانسیته در خصوص تاثیر سطوح مختلف درصد پوسته شالی بر تغییر مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و دانسیته (شکل های ۳-A، B و C)، نتایج حاکی از روند کاهشی

۳۰/۴۶ درصد افزایش یافت. مقادیر ۱۲ و ۲۴ میلیمتر نسبت به نمونه بدون الیاف تفاوت معنی داری نشان نداد. نکته حائز اهمیت، کاهش مدول گسیختگی الیاف با طول ۲۴ میلیمتر نسبت به تخته‌های با الیاف ۱۸ میلیمتر می‌باشد. با افزایش طول الیاف از صفر (نمونه‌های بدون الیاف) تا ۲۴ میلی متر مدول الاستیسیته به میزان ۱۱/۷۵ درصد افزایش یافت، با این حال بین تیمارهای بدون الیاف، ۱۲، و ۲۴ میلیمتر تفاوت معنی داری مشاهده نشد. با افزایش طول الیاف از صفر (تخته‌های بدون الیاف) به ۲۴ میلی متر مقادیر دانسیته به میزان ۷/۲۷ درصد کاهش یافت همچنین بین تیمارهای بدون الیاف، ۱۲ و ۲۴ اختلاف معنی دار مشاهده شد، اما بین تخته‌های ساخته شده با طول ۲۴ و ۱۸ اختلاف معنی داری مشاهده نشد.

همچنین تاثیر مستقل درصد آب به سیمان بر مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و دانسیته (شکل‌های ۳- E.D و F)، نشان از کاهش معنی دار هر سه متغیر وابسته می‌باشد، به نحوی که با افزایش آب به سیمان از ۳۰ درصد به ۴۰ درصد، مدول گسیختگی از ۳/۵۶۳ به ۲/۰۹۴ مگاپاسگال (۴۱/۲۱ درصد)، مدول الاستیسیته از ۲۷۰۰/۲۸ به ۱۴۴۸/۶۹۰ مگاپاسگال (۴۶/۳۵ درصد) و دانسیته نیز از ۱/۳۶۸۳ به ۱/۱۲۳۰ گرم بر سانتیمتر مکعب (۱۷/۹۳ درصد) کاهش یافت.

در خصوص تاثیر مستقل طول الیاف بر مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و دانسیته (شکل‌های ۳- I و H.G)، نتایج نشان داد که با افزایش طول الیاف از صفر (بدون الیاف) به ۱۸ میلیمتر، مدول گسیختگی به میزان



شکل ۳. تاثیر مستقل درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان و طول الیاف بر مقاومت خمشی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE) و دانسیته (D)

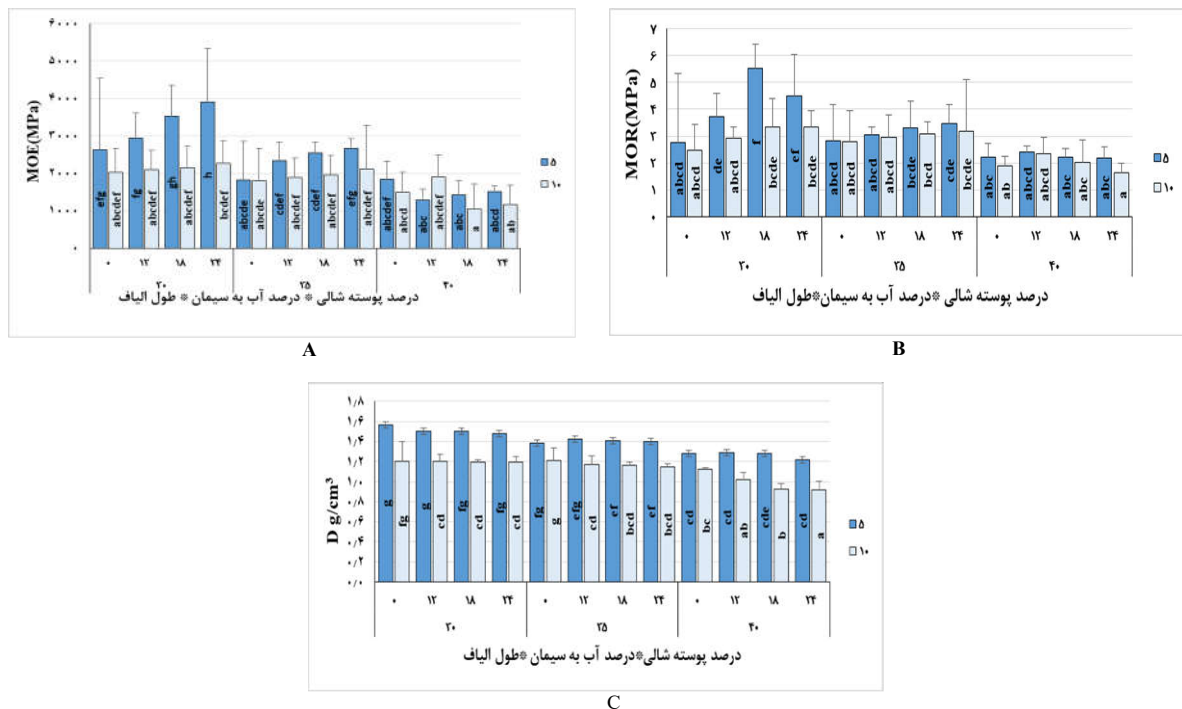
اثر متقابل درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان و طول الیاف بر مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و دانسیته

برای مقایسه میانگین بین تمامی تیمارها، تاثیر متقابل هر سه متغیر مستقل به صورت همزمان بر مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و دانسیته در اینجا ارائه شده است. نتایج اثر متقابل هر سه فاکتور درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان و طول الیاف نشان داد که بیشترین مدول گسیختگی مربوط به تخته‌های با درصد پوسته شالی ۵، آب به سیمان ۳۰ درصد و طول الیاف ۱۸ می‌باشد (شکل ۴- A). روند عمومی تغییرات مدول گسیختگی در حالتی که میزان آب به سیمان ۳۰ و ۳۵ درصد بود با افزایش طول الیاف در تخته‌های با پوسته شالی ۵ یا ۱۰ درصد روند افزایش داشت، به استثنای تیماری که میزان آب به سیمان ۳۰ درصد، طول الیاف ۲۴ میلیمتر و میزان پوسته شالی ۵ درصد بود. این در حالیست که در میزان آب به سیمان ۴۰ درصد با افزایش طول الیاف، در تخته‌های با ۵ و ۱۰ درصد پوسته شالی روند تقریباً کاهشی بوده است. با افزایش درصد آب به سیمان در همه تیمارها مقدار مدول گسیختگی کاهش یافته است. با افزایش طول الیاف از صفر به ۱۸ میلیمتر مدول گسیختگی برای درصد آب به سیمان ۳۰ و پوسته شالی ۵ درصد از ۲/۷۶۵ به ۵/۵۲۷۱ مگاپاسکال به میزان ۶۲/۵۱ درصد افزایش یافت. برای ۱۰ درصد پوسته شالی مدول گسیختگی از ۲/۴۶۸ به ۳/۳۲۵۰ به میزان ۳۵/۳۶ درصد افزایش یافت. همچنین این افزایش برای تخته‌های با درصد آب به سیمان ۳۵ و پوسته شالی ۵ درصد نیز از ۲/۸۱۱ به ۳/۴۶۲ به میزان ۲۳/۱۳ درصد بود. برای پوسته شالی ۱۰ درصد مدول گسیختگی از ۲/۷۸۱ به ۳/۱۶۱ به میزان ۱۳/۶۶ درصد افزایش یافت. برای تخته‌های با درصد آب به سیمان ۴۰ درصد و پوسته شالی ۵ درصد نیز مدول گسیختگی از ۲/۲۲۰ به ۲/۱۷۱ به میزان ۱۴/۰۳ درصد کاهش یافت. برای تخته‌های با درصد آب به سیمان ۴۰ درصد و ۱۰ درصد پوسته شالی نیز مدول گسیختگی از ۱/۸۸۳ به ۱/۶۲۰ به میزان ۱۳/۹۶ درصد کاهش یافت.

در خصوص مدول الاستیسیته، نتایج اثر متقابل هر سه فاکتور درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان و درصد طول الیاف نشان داد که بیشترین مدول الاستیسیته مربوط

به درصد پوسته شالی ۵، درصد آب به سیمان ۳۰ و طول الیاف ۲۴ بوده و کمترین آن نیز مربوط به درصد پوسته شالی ۱۰، درصد آب به سیمان ۴۰ و طول الیاف ۲۴ میلیمتر بود (شکل ۴- B). با افزایش طول الیاف از صفر به ۲۴ میلیمتر مدول الاستیسیته برای درصد پوسته شالی ۵ درصد، درصد آب به سیمان ۳۰ از ۲۶۲۸/۲۹ به ۳۹۰۳/۱۴ به میزان ۴۸/۵۰ درصد، برای درصد پوسته شالی ۱۰ از ۲۰۲۹/۳۴ به ۲۲۶۹/۰۶ به میزان ۱۱/۸۱ درصد افزایش یافت. برای درصد آب به سیمان ۳۵ درصد و درصد پوسته شالی ۵ درصد مدول الاستیسیته از ۱۸۲۱/۲۷ به ۲۶۷۴/۴۲ به میزان ۴۶/۸۴ درصد، برای ۱۰ درصد پوسته شالی از ۱۷۹۹/۲۹ به ۲۱۱۸/۸۱ به میزان ۱۷/۷۶ درصد افزایش یافت.

نتایج اثر متقابل هر سه فاکتور درصد پوسته شالی، نسبت آب به سیمان و درصد طول الیاف بر روی دانسیته تخته‌های ساخته شده نشان داد که بیشترین دانسیته مربوط به درصد پوسته شالی ۵ درصد، درصد آب به سیمان ۳۰ بدون الیاف شیشه و کمترین دانسیته نیز مربوط به درصد پوسته شالی ۵ درصد، درصد آب به سیمان ۴۰ و طول الیاف ۲۴ میلیمتر می‌باشد (شکل ۴- C). همانطوری که در این شکل قابل مشاهده است با افزایش درصد آب به سیمان میزان دانسیته روند کاهشی داشته و با تغییر طول الیاف روند تغییر نکرد و در تمام تیمارها، دانسیته تخته‌ها با افزایش درصد پوسته شالی کاهش یافت. دانسیته تخته‌ها با افزایش طول الیاف از صفر (بدون الیاف) به ۲۴ میلیمتر برای پوسته شالی ۵ درصد و درصد آب به سیمان ۳۰ درصد از ۱/۵۶۸ به ۱/۴۷۸ به میزان ۵/۷۶ درصد کاهش، و برای ۱۰ درصد پوسته شالی نیز از ۱/۲۰۵ به ۱/۱۹۶ به میزان ۱/۱۶ درصد کاهش یافت. همچنین برای درصد آب به سیمان ۳۵ درصد و پوسته شالی ۵ درصد نیز دانسیته از ۱/۳۸۶ به ۱/۳۹۸ به میزان ۰/۸۷ درصد افزایش و برای ۱۰ درصد پوسته شالی از ۱/۲۰۸ به ۱/۱۴۷ به مقدار ۵/۰۸ درصد کاهش یافت. برای درصد آب به سیمان ۴۰ و درصد پوسته شالی ۵ دانسیته از ۱/۲۷۹ به ۱/۲۱۹ به میزان ۴/۶۷ درصد کاهش و برای ۱۰ درصد پوسته شالی دانسیته از ۱/۱۲۱ به ۰/۹۲۰ به میزان ۲۰/۱۹ درصد کاهش یافت.



شکل ۴: تاثیر متقابل پوسته شالی* درصد آب به سیمان* طول الیاف بر مقاومت خمشی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE) و دانسیته (D)

به ترتیب به میزان ۱۷/۲۴ و ۲۳/۳۷ درصد افزایش یافت. می‌توان گفت که با افزایش طول الیاف، سطح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی افزایش می‌یابد. این امر سبب بهبود انتقال بار از ماتریس به الیاف می‌شود و در نتیجه مدول گسیختگی افزایش می‌یابد. در واقع الیاف بلندتر می‌توانند نقاط ضعف موجود در ساختار را پوشش دهند و به توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها کمک کنند. این ویژگی باعث می‌شود که ماده در برابر بارهای خمشی مقاوم‌تر شود. از طرف دیگر افزایش طول ممکن است سبب کلوخه شدن الیاف شود و مقاومت‌های چندسازه را کاهش دهد که در این تحقیق مشاهده شد که چندسازه‌های تقویت شده با الیاف شیشه با طول ۲۴ میلیمتر مقاومت کمتری نسبت به تخته‌های ساخته شده با الیاف شیشه با طول ۱۸ میلیمتر داشتند. Wei و Tomita (۲۰۰۱) نیز به نتایج مشابهی رسیدند و بیان کردند که افزودن ۲۰ درصد الیاف شیشه مقاوم به قلیا، منجر به افزایش ۲۳/۲ درصد در مقدار مدول گسیختگی بتن می‌شود [۲۰]. همچنین در تحقیقی دیگر مشاهده شد که افزایش طول الیاف پلی پروپیلن از ۶ به ۱۲ میلی متر باعث افزایش مقاومت و مدول خمشی بتن به میزان ۲۳/۴ و ۳۱/۱ می‌شود [۱۱].

طبق نتایج به دست آمده از تخته‌های چوب سیمان ساخته شده از پوسته شالی که به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده‌اند، مدول گسیختگی برای این تخته‌ها از ۵ درصد پوسته شالی به ۱۰ درصد به میزان ۱۷/۵۵ درصد کاهش یافته است. با افزایش مقدار پوسته شالی، تخلخل افزایش یافته و باعث کاهش مدول گسیختگی می‌شود. علاوه بر آن توزیع نامناسب پوسته شالی در مخلوط می‌تواند نقاط ضعف برای تحمل بار ایجاد کند [۱۷]. حسینی و همکاران (۱۳۹۰)، بیان داشتند که تخته‌های با نسبت الیاف به سیمان ۹۰ به ۱۰ دارای بیشترین مدول گسیختگی می‌باشند [۱۸]. Fernandez و همکاران (۲۰۰۲) در تحقیقی با بررسی امکان استفاده از لجن کارخانه‌های خمیر سازی یافتند که تخته‌های با نسبت سیمان به الیاف ۶۰ به ۴۰ نسبت به تخته‌های با نسبت ۵۰ به ۵۰ مدول گسیختگی بیشتری دارند [۱۹]. نتایج نشان داد که افزودن الیاف تقویت کننده مانند الیاف شیشه با طول‌های مختلف به تخته‌های چوب سیمان به طور کلی باعث افزایش مدول گسیختگی این تخته‌ها شده است. مدول گسیختگی تخته‌ها با افزودن الیاف شیشه با طول ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر نسبت به نمونه‌های بدون الیاف،

Cao و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که مدول گسیختگی الیاف به طول آن‌ها وابسته است و با افزایش طول الیاف مدول گسیختگی محصول نیز افزایش می‌یابد [۲۱]. همچنین تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن الیاف شیشه به میزان ۱ تا ۳ درصد می‌تواند مدول گسیختگی را تا ۳۰ درصد افزایش دهد [۲۲]. با افزایش درصد آب به سیمان در این تحقیق مدول گسیختگی کاهش یافت. از آنجایی که سیمان به آب نیاز دارد تا هیدراته شود و پیوندهای قوی-تری را ایجاد کند، با افزایش مقدار آب، با لحاظ مقدار ثابت دوغاب سیمان، نسبت سیمان مصرفی در تخته، کاهش یافته و این امر باعث می‌شود که پیوندهای ضعیف‌تری در ساختار نهایی ایجاد شود. همچنین از دلایل دیگر می‌توان گفت که افزایش درصد آب به سیمان باعث تخلخل و کاهش چگالی در مخلوط سیمان شده که باعث ایجاد فضای خالی بیشتری در ساختار می‌شود، که می‌تواند باعث ضعف در پیوندهای بین ذرات سیمان و الیاف شود [۲۳، ۲۴]. در این تحقیق مدول الاستیسیته برای تخته‌های چوب سیمان ساخته شده از ۵ درصد پوستره شالی به ۱۰ درصد به میزان ۲۴/۳۳ درصد کاهش یافت. برای توجیه این نتیجه می‌توان بیان کرد که افزودن بیش از حد پوستره شالی ممکن است باعث افزایش تخلخل در تخته‌ها شود. تخلخل بیشتر می‌تواند به کاهش چگالی و استحکام مواد منجر شود و در نتیجه مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد [۱۲]. همچنین با افزایش درصد آب به سیمان مدول الاستیسیته نیز کاهش یافت، که دلیل آن را می‌توان به کاهش چسبندگی بین ذرات سیمان و پوستره شالی در نسبت بالای آب و افزایش تخلخل در ساختار نهایی نسبت داد. افزایش طول الیاف شیشه از ۱۲ میلی‌متر به ۲۴ میلی‌متر باعث افزایش مدول الاستیسیته شد. برای توجیه آن می‌توان بیان کرد که الیاف بلندتر سطح تماس بیشتری با ماده زمینه سیمان و آب دارند. این افزایش سطح تماس می‌تواند باعث بهبود پیوند بین الیاف و ماده زمینه شود که منجر به انتقال بهتر نیروها و افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. همچنین الیاف شیشه بلندتر بهتر می‌توانند در برابر تغییر شکل‌های ناشی از بارهای خارجی مقاومت کنند. این ویژگی باعث می‌شود که ماده در برابر تنش‌های فشاری و کششی عملکرد بهتری داشته باشد و با افزایش طول الیاف شیشه نیز توانایی آن‌ها در جذب و توزیع نیروهای اعمال شده نیز افزایش یافته و

سبب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود [۲۵]. در این مطالعه نیز افزایش مقاومت و مدول خمشی با افزایش طول الیاف شیشه به ویژه در تخته‌های با نسبت کمتر آب به سیمان مشهود است. دانسیته تخته‌های چوب سیمان با افزایش درصد پوستره شالی در ساخته شده از ۵ درصد به ۱۰ درصد به میزان ۲۰/۰۹ درصد کاهش یافت. با افزایش درصد پوستره شالی، مقدار سیمان در مخلوط کاهش می‌یابد. از آنجایی که سیمان به عنوان یک ماده متراکم و سنگین نقش مهمی در افزایش دانسیته تخته‌ها دارد، کاهش مقدار سیمان باعث کاهش دانسیته کلی می‌شود. پورهوشیار ضیابری و همکاران (۱۳۹۲) با ساخت بلوک-های چوب سیمان نشان دادند که افزایش مقدار خاکستر سیوس برنج از صفر به ۵۰ درصد باعث کاهش دانسیته می‌شود [۲۶]. از سویی دیگر، افزایش درصد آب به سیمان باعث کاهش دانسیته تخته‌ها می‌شود. وقتی درصد آب به سیمان افزایش می‌یابد، مقدار سیمان در مقدار دوغاب ثابت، نسبت به آب کاهش می‌یابد. از آنجایی که سیمان یک ماده متراکم است، کاهش مقدار سیمان به طور مستقیم باعث کاهش دانسیته می‌شود. افزایش طول الیاف شیشه باعث کاهش دانسیته تخته‌های ساخته شده می‌شود. در واقع الیاف شیشه با طول بلندتر سبب ایجاد ساختار متخلخل‌تری در تخته‌ها می‌شود. این تخلخل منجر به افزایش فضای خالی در ماده و کاهش دانسیته نهایی تخته‌ها می‌شود. همچنین افزایش طول الیاف شیشه به معنای استفاده از حجم بیشتری از الیاف سبک‌تر به جای مواد سنگین‌تر (سیمان) است. این تغییر می‌تواند منجر به کاهش وزن کل تخته و در نتیجه کاهش دانسیته شود [۲۷].

نتیجه گیری

در این تحقیق، استفاده از پوستره شالی به عنوان ضایعات کشاورزی، الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده و کلرید کلسیم به عنوان ماده افزودنی برای ساخت تخته چوب سیمان مورد استفاده قرار گرفت. این پژوهش عملکرد الیاف شیشه با طول‌های مختلف به عنوان تقویت کننده و بهبود دهنده خواص مقاومتی در ساخت تخته چوب سیمان را مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد و نتایج کلی زیر به دست آمد:

شیشه می‌توان تخته‌هایی با دانسیته کمتر اما مقاومت خمشی بالاتر تولید کرد؛ به عبارت دیگر، تقویت با الیاف شیشه امکان کاهش دانسیته بدون افت عملکرد سازه‌ای را فراهم می‌سازد. این ویژگی از منظر مهندسی مصالح سبک ساختمانی، مزیتی راهبردی محسوب می‌شود. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که طراحی بهینه اختلاط شامل نسبت آب به سیمان پایین، درصد مناسب پوسته شالی و استفاده هدفمند از الیاف شیشه با طول مناسب، می‌تواند به تولید کامپوزیت‌هایی با تعادل مطلوب بین سبکی، پایداری زیست‌محیطی و عملکرد مکانیکی منجر شود.

منابع

- [1] Mohammadkazemi, F., Doost, H.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. *Journal of Forest and Wood Products*, 66(2), pp.192-201. (In Persian)
- [2] Sadeghipanah, V., Nazerian, M., Nosrati Sheshkal, B. and Mohebbi Gargari, R., 2020. Optimization of production variables of natural fibers-cement composites by response surface methodology (RSM). *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 11(1), pp.97-108. (In Persian)
- [3] Yasuda, S., Hirano, J., Tange, J., Nagadomi, W. and Tachi, M., 1989. Manufacture of wood-cement boards. III. Cement-hardening inhibitory components of western red cedar heartwood. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 9(1), pp.123-133.
- [4] Ashori, A., Tabarsa, T., Azizi, K. and Mirzabeygi, R., 2011. Wood-wool cement board using mixture of eucalypt and poplar. *Industrial Crops and Products*, 34(3), pp.1146-1149.
- [5] Banthia, N. and Nandakumar, N., 2003. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), pp.3-9.
- [6] Enfedaque, A., Paradelo, L.S. and Sánchez-Gálvez, V., 2012. An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). *Construction and Building Materials*, 27(1), pp.425-431.
- [7] Demirdağ, C., Nodehi, M., Bideci, A., Bideci, Ö.S., Tuncer, M., Gencel, O. and Ozbakkaloglu, T., 2024. The use of natural (coconut) and artificial (glass) fibers in cement-polymer composites: an experimental study. *Construction and Building Materials*, 412, 134895.
- [8] Saghi, H. and Delbari, H., 2016. The effect of the polymer fibers and concrete strength on plastic shrinkage cracking in concrete slabs. *Concrete Research*, 8(2), pp.35-46. (In Persian)

- بیشترین مدول گسیختگی مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد پوسته شالی، ۳۰ درصد آب به سیمان و طول الیاف ۱۸ میلی‌متر (۴/۵۱MPa) و کمترین آن مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۱۰ درصد پوسته شالی، درصد آب به سیمان ۴۰ بدون الیاف تقویت کننده (۲/۰۵۳MPa) بود. بیشترین مدول الاستیسیته خمشی مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد پوسته شالی، ۳۰ درصد آب به سیمان و طول الیاف ۲۴ میلی‌متر (۳۰۲۳/۲۵MPa) و کمترین آن مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۱۰ درصد پوسته شالی ۴۰ درصد آب به سیمان بدون الیاف تقویت کننده (۱۶۶۷/۰۲MPa) بود. کمترین دانسیته مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۱۰ درصد پوسته شالی، ۴۰ درصد آب به سیمان و طول الیاف ۲۴ میلی‌متر (۱/۶۹۹۰g/cm³) و بیشترین آن مربوط به تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد پوسته شالی، ۳۰ درصد آب به سیمان بدون الیاف تقویت کننده (۱/۳۹۹۲g/cm³) بود. در نمونه‌های مطالعه شده، با افزایش مقدار پوسته شالی از ۵ به ۱۰ درصد مقدار MOR، MOE و دانسیته به ترتیب ۱۷/۵۵ و ۲۴/۳۳ و ۲۰/۸۸ درصد کاهش یافت. در نمونه‌های مطالعه شده، با افزایش درصد آب به سیمان از ۳۰ به ۴۰ درصد مقدار MOR، MOE و دانسیته به ترتیب ۴۱/۲۱، ۴۶/۳۵ و ۱۷/۹۳ درصد کاهش یافت. در نمونه‌های تقویت شده، با افزایش طول الیاف از صفر (نمونه‌های بدون الیاف) به ۱۸ میلی‌متر مقدار MOR، ۳۰/۴۶ درصد افزایش و مقدار MOE ۱۰/۵۱ درصد افزایش و مقدار دانسیته ۷/۲۷ درصد کاهش یافت. نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد خمشی تخته‌های چوب سیمان به‌طور مستقیم تحت تأثیر طراحی اختلاط و برهم‌کنش میان فاز سیمانی، فاز لیگنوسلولزی (پوسته شالی) و تقویت‌کننده الیافی قرار دارد. افزایش درصد پوسته شالی و افزایش نسبت آب به سیمان، با ایجاد تخلخل بیشتر و تضعیف ناحیه انتقالی بین سیمان و چوب، منجر به کاهش مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و دانسیته گردید. در مقابل، استفاده از الیاف شیشه به‌عنوان تقویت‌کننده نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود رفتار خمشی ایفا نمود. حضور الیاف شیشه با طول بهینه، از طریق مکانیزم‌هایی مانند پل‌زنی، بهبود انتقال تنش و افزایش ظرفیت جذب انرژی، موجب افزایش مقاومت و مدول خمشی شد. نکته مهم و کاربردی این پژوهش آن است که با استفاده از الیاف

- Natural Resources Research, 4(1), pp.35-46. (In Persian)
- [18] Tabarsa, T., Hosseini, S.M. and Valizadeh, E., 2012. Investigation on the properties of cement fiber board produced using waste paper. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 27(2), pp.338-347. (In Persian)
- [19] Fernandez, E.C., Lamason, C.R.G. and Delgado, T.S., 2002. Cement-bonded boards from wastewater treatment sludge of a recycled paper mill. ACIAR Proceedings, pp.73-80.
- [20] Wei, Y.M. and Tomita, B., 2001. Effects of five additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards. Journal of Wood Science, 47(6), pp.437-444.
- [21] Cao, Y., Shibata, S. and Fukumoto, I., 2006. Fabrication and flexural properties of bagasse fiber reinforced biodegradable composites. Journal of Macromolecular Science, Part B, 45(3), pp.463-474.
- [22] Golbabaee, F., Salehi, K. and Hajihassani, R., 2019. Use of bagasse in the manufacture of reinforced wood-fiber cement composite. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 34(2), pp.302-310. (In Persian)
- [23] Moradi, M.S., Tavana, M.H., Habibi, M.R. and Amiri, M., 2024. Effect of water to cement ratio on mechanical properties of FRC subjected to elevated temperatures: experimental and soft computing approaches. Heliyon, 10(21).
- [24] Wang, P., Wu, H.L. and Leung, C.K., 2022. Effects of water-to-cement ratio on the performance of concrete and embedded GFRP reinforcement. Construction and Building Materials, 351, 128833.
- [25] Georgiou, A.V. and Pantazopoulou, S.J., 2016. Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites. Construction and Building Materials, 125, pp.1216-1228.
- [26] Ziabari, K., Torkaman, J., Ashori, A. and Hamzeh, Y., 2013. Fabrication of cement blocks using rice husk ash and lignocellulosic fibers. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 28(2), pp.393-404. (In Persian)
- [27] Rebolledo, P., Cloutier, A. and Yemele, M.-C., 2018. Effect of density and fiber size on porosity and thermal conductivity of fiberboard mats. Fibers, 6(4), 81.
- [9] Tonoli, G.H.D., Savastano Jr, H., Santos, S.F.D., Dias, C., John, V.M. and Lahr, F.A.R., 2011. Hybrid reinforcement of sisal and polypropylene fibers in cement-based composites. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(2), pp.177-187.
- [10] Bagherzadeh, R., Sadeghi, A.-H. and Latifi, M., 2012. Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete. Textile Research Journal, 82(1), pp.88-96.
- [11] Bagherzadeh, R., Pakravan, H.R., Sadeghi, A.-H., Latifi, M. and Merati, A.A., 2012. An investigation on adding polypropylene fibers to reinforce lightweight cement composites (LWC). Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 7(4), 155892501200700410.
- [12] Ghofrani, M., Mokaram, K.N., Ashori, A. and Torkaman, J., 2015. Fiber-cement composite using rice stalk fiber and rice husk ash: mechanical and physical properties. Journal of Composite Materials, 49(26), pp.3317-3322.
- [13] Al-Alwan, A.A.K., Al-Bazoon, M., Mussa, F.I., Alalwan, H.A., Shadhar, M.H., Mohammed, M.M. and Mohammed, M.F., 2024. The impact of using rice husk ash as a replacement material in concrete: an experimental study. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 36(4), pp.249-255.
- [14] Zhang, S.W., Wang, R., Zhang, J.L. and Yuan, Y., 2024. Enhancing toughness in cement-based composites: unraveling the composite effect mechanisms of polymers and fibers through physic testing and molecular dynamics simulations. Composites Part B: Engineering, 287, 111827.
- [15] Zhou, B., Zhang, M., Ma, G. and Zhang, R., 2025. Evaluation of mechanical properties, durability, and sustainability of concrete reinforced with recycled GFRP fibers: experiments and optimization. Journal of Building Engineering, 113111.
- [16] Haque, M., Ray, S., Mita, A.F., Bhattacharjee, S. and Shams, M.J.B., 2021. Prediction and optimization of the fresh and hardened properties of concrete containing rice husk ash and glass fiber using response surface methodology. Case Studies in Construction Materials, 14, e00505.
- [17] Mehdinia, M., Janahmadi, M., Farajpoor, A., Tabei, A. and Kamrani, S., 2013. Investigation on effect of lignocellulosic wastes (rice straw and husk) using wood-cement composite. Journal of Renewable