

Evaluation of composite made of rice husk and gypsum using bacterial nanocellulose fiber (BNCF)

Ali Hassanpoor Tichi^{1*}, Mesam Razavi², Amin Khatiri³

1- Corresponding author, Assistant Professor, Department of Applied Industries Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. Email: hasanpoortichi@gmail.com

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

3- PhD student, Department of Science and Wood and Paper Industries, Noor Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran Province, Iran

Received: January 2025

Accepted: May 2025

Abstract

Problem definition and objectives: In countries such as Iran, where forest resources are limited, utilizing agricultural residues for the production of eco-friendly panels is considered an effective strategy to reduce dependence on wood and prevent deforestation. On the other hand, given the abundance of mineral resources in Iran, incorporating these materials into mineral-based composites can help alleviate pressure on forest resources. In this context, the present study investigates the effect of bacterial nanocellulose as a reinforcing agent on the physical, mechanical, and thermal properties of composite boards made from gypsum (as a mineral binder) and rice husk (as filler). The objective of this research is to assess the feasibility of using this composite as a sustainable and environmentally friendly construction material.

Methodology: The experimental variables in this study included the weight ratios of bacterial cellulose nanofibers, rice husk, and gypsum at levels of 90:10, 80:20, and 70:30, based on the dry weight of gypsum. Bacterial cellulose nanofibers were incorporated at concentrations of 1%, 2%, and 3% to enhance the bonding between gypsum and rice husk. In total, nine treatment combinations were designed, resulting in the fabrication of 27 laboratory-scale composite boards. The test specimens were manufactured with a uniform thickness of 16 mm, and the final density of all boards was maintained at 1.10 g/cm³. The mechanical and physical properties of the samples were subsequently assessed, including modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bond (IB), thickness swelling after 2 and 24 hours of water immersion, board density, and fire resistance (measured as the percentage of weight loss).

Results: The results demonstrated that increasing the proportion of rice husk in the composite structure significantly influenced the physical and mechanical properties of the panels. A higher rice husk content led to a decrease in the modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond strength (IB), which can be attributed to increased porosity, uneven particle distribution, and reduced adhesion between components. Scanning electron microscopy (SEM) analysis revealed that the addition of bacterial nanocellulose (BNCF) improved particle distribution, minimized structural defects, and enhanced the cohesion between gypsum and rice husk, ultimately leading to improved mechanical properties of the composite. Since rice husk

contains high levels of silica (SiO_2), it is expected that the inherent silica also contributes to reinforcing structural bonds and enhancing the mechanical strength of the composite. However, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis showed a noticeable increase in the intensity of peaks associated with hydroxyl (O-H) and glycosidic (C-O) bonds in samples containing bacterial nanocellulose. Since glycosidic (C-O) bonds are not exclusive to nanocellulose and are also present in the cellulose structure of rice husk, a portion of these peaks may originate from the rice husk itself. Nonetheless, a comparative FTIR analysis between samples with and without nanocellulose confirmed that the increased intensity of these peaks in the presence of BNCF indicates improved interfacial bonding and enhanced structural adhesion. Therefore, while the silica in rice husk contributes to the reinforcement of gypsum-based bonds, the improved mechanical strength of composites containing nanocellulose is primarily attributed to structural optimization, reduced void spaces, and enhanced interfacial cohesion rather than a direct reaction between nanocellulose and gypsum. Additionally, although glycosidic bonds are also found in rice husk cellulose, their increased intensity in nanocellulose-containing samples highlights the role of nanocellulose in enhancing the composite structure.

Conclusion: The addition of bacterial nanocellulose enhanced matrix cohesion and reduced porosity, leading to lower water permeability and improved dimensional stability of the composites. While the silica content in rice husk contributed to enhancing the mechanical and thermal properties of the panels, the plant-based structure of rice husk increased porosity and moisture absorption. Furthermore, due to its low thermal conductivity and bio-based nature, bacterial nanocellulose reduced the fire resistance of the composite panels. These composites, exhibiting improved mechanical strength and physical durability, demonstrate significant potential for use in interior building panels and other non-load-bearing structures, offering a sustainable alternative to conventional materials.

Keywords: Nano cellulose, internal bond strength, rice husk, modulus of rupture, gypsum composite

استفاده از نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) برای بهبود خواص کامپوزیت ساخته شده از شلتوک برنج و گچ

علی حسن پور تیچی^{۱*}، میثم رضوی^۲، امین خطیری^۳

۱- نویسنده مسئول، استادیار، گروه صنایع کاربردی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: hasanpoortichi@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس استان تهران، ایران

تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: دی ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: در کشورهایی مانند ایران که منابع جنگلی محدود هستند، و استفاده از پسماندهای کشاورزی برای تولید پانل‌های سازگار با محیط زیست به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش وابستگی به چوب و جلوگیری از قطع درختان توصیه می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به فراوانی منابع معدنی در ایران، استفاده از آن‌ها در کامپوزیت‌های پایه معدنی می‌تواند به کاهش فشار بر جنگل‌ها کمک کند. در این راستا، پژوهش حاضر به بررسی تأثیر نانوسلولز باکتریایی به عنوان عامل تقویت‌کننده بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی تخته‌های کامپوزیتی ساخته شده از گچ (به عنوان چسب معدنی) و شلتوک برنج (به عنوان پرکننده) می‌پردازد. هدف این مطالعه، ارزیابی امکان‌پذیری استفاده از این کامپوزیت به عنوان یک مصالح ساختمانی پایدار و دوستدار محیط زیست است.

مواد و روشها: عوامل متغیر در این پژوهش شامل نسبت‌های وزنی شلتوک برنج و گچ به مقادیر ۹۰:۱۰، ۸۰:۲۰ و ۷۰:۳۰ نسبت به وزن خشک گچ بودند. نانوالیاف سلولز باکتریایی در سطوح ۱ درصد، ۲ درصد و ۳ درصد برای بهبود اتصال بین گچ و شلتوک برنج مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع، با در نظر گرفتن ۹ تیمار، تعداد ۲۷ تخته آزمایشگاهی تولید شد. ضخامت تخته‌های آزمون ۱۶ میلی‌متر و دانسیته نهایی تمام تخته‌ها برابر با $1/10 \text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته شد. سپس خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها شامل مدول گسیختگی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE)، چسبندگی داخلی (IB)، واکشیدگی ضخامت پس از غوطه‌وری ۲ و ۲۴ ساعت در آب، دانسیته تخته‌ها و مقاومت به آتش (درصد کاهش وزن) اندازه‌گیری شدند.

نتایج: نتایج نشان داد که افزایش میزان شلتوک برنج در ساختار کامپوزیت تأثیر قابل‌توجهی بر خواص فیزیکی و مکانیکی پانل‌ها دارد. افزایش نسبت شلتوک برنج منجر به کاهش مقادیر مدول گسیختگی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE) و مقاومت چسبندگی داخلی (IB) شد که این کاهش را می‌توان به افزایش تخلخل، توزیع غیریکنواخت ذرات و کاهش چسبندگی بین اجزا نسبت داد. بررسی تصاویر میکروسکوپی (SEM) نشان داد که افزودن نانوسلولز باکتریایی (BNCF) باعث بهبود توزیع ذرات، کاهش نقص‌های ساختاری و افزایش انسجام بین گچ و شلتوک برنج شده است که منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت گردید. از آنجا که شلتوک برنج حاوی مقادیر بالایی سیلیس (SiO_2) است، انتظار می‌رود که سیلیس موجود در آن نیز در تقویت پیوندهای ساختاری و افزایش مقاومت مکانیکی کامپوزیت نقش داشته باشد. با این حال، نتایج FTIR نشان داد که افزایش شدت پیک‌های مربوط به گروه‌های هیدروکسیل (O-H) و پیوندهای گلوکوزیدی (C-O) در نمونه‌های حاوی نانوسلولز مشهودتر است. از آنجایی که پیوندهای گلوکوزیدی (C-O) تنها در نانوسلولز مشاهده نمی‌شوند و در سلولز موجود در شلتوک برنج نیز حضور دارند، این احتمال وجود دارد که بخشی از این پیک‌ها مربوط به ساختار سلولزی شلتوک باشد. با این حال، مقایسه طیف FTIR بین نمونه‌های فاقد نانوسلولز و نمونه‌های حاوی BNCF نشان داد که افزایش شدت این پیک‌ها در حضور نانوسلولز باکتریایی، بهبود پیوندهای بین اجزا و افزایش چسبندگی ساختاری را تأیید می‌کند. بنابراین، در حالی که سیلیس موجود در شلتوک برنج نیز در تقویت

پیوندهای گچی مؤثر است، افزایش مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های حاوی نانوسلولز بیشتر به بهینه‌سازی ساختار، کاهش فضاهای خالی، و بهبود انسجام بین اجزا نسبت داده می‌شود تا واکنش مستقیم نانوسلولز با گچ. علاوه بر این، هرچند پیوندهای گلوکوزیدی در سلولز شلتوک برنج نیز یافت می‌شوند، افزایش شدت این پیوندها در نمونه‌های دارای نانوسلولز نشان‌دهنده تأثیر نانوسلولز بر بهبود ساختار کامپوزیت است.

نتیجه‌گیری: افزودن نانوسلولز باکتریایی با بهبود انسجام ماتریس و کاهش تخلخل، موجب کاهش نفوذپذیری آب و بهبود پایداری ابعادی کامپوزیت‌ها شد. سیلیس موجود در شلتوک برنج می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی تخته‌ها شود، اما شلتوک به دلیل ساختار گیاهی باعث افزایش تخلخل و جذب بیشتر رطوبت می‌گردد. نانوسلولز باکتریایی به دلیل انتقال حرارت بسیار کم و طبیعت زیستی، سبب کاهش مقاومت تخته‌ها در برابر آتش شد. این کامپوزیت‌ها که دارای استحکام مکانیکی و مقاومت فیزیکی بهبودیافته‌ای هستند، پتانسیل قابل توجهی برای استفاده در پانل‌های داخلی ساختمان و دیگر سازه‌های غیرباربر دارند و جایگزینی پایدار برای مواد سنتی محسوب می‌شوند.

واژه های کلیدی: نانوالیاف سلولز باکتریایی، چسبندگی داخلی، شلتوک برنج، مدول گسیختگی، کامپوزیت گچی

مقدمه

چوب به عنوان یک منبع حیاتی برای تأمین مواد اولیه در حوزه‌های مسکن، انرژی و تزئینات شناخته می‌شود. اما استفاده بیش از حد از چوب باعث تخریب جنگل‌های طبیعی شده و مصرف‌کنندگان به اهمیت حفظ این منابع آگاه‌تر شده‌اند. به همین دلیل، جایگزین‌هایی مانند بقایای کشاورزی، ضایعات چوبی کم ارزش و مواد غیرچوبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این حال، تولید جهانی مصالح ساختمانی چوبی به دلیل صنعتی شدن کاهش یافته و انتظار می‌رود این روند ادامه یابد. همچنین، افزایش قیمت مواد اولیه چوبی مانع، از رشد تجارت محصولات چوبی می‌شود [۱]. امروزه بحران محیط زیست به یک مسئله جهانی تبدیل شده و استفاده از مواد دوستدار محیط زیست و کاهش وابستگی به منابع تجدیدناپذیر ضروری است. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر منابع زیست‌محیطی تجزیه‌پذیر نیز بخشی از این نیاز است. پانل‌های گچی به عنوان مصالح جداسازی فضاهای داخلی ساختمان‌ها استفاده می‌شوند، اما این پانل‌ها شکننده و دارای مقاومت خمشی و ضربه کمی هستند. در این زمینه، سازه‌های الیاف-گچ کیفیت بهتری دارند و در مقایسه با تخته‌لایه‌ها و نئوپان، غیرقابل اشتعال بوده و خواص ایزولاسیون صوتی و حرارتی بهتری دارند و سبک‌تر از پانل‌های گچی خالص هستند [۲].

در سال‌های اخیر، فناوری تولید تخته‌های چوب-سیمان و الیاف-گچ به سرعت رشد کرده و خطوط تولید این محصولات در بسیاری از کشورها راه‌اندازی شده است.

گچ به عنوان یک ماده پرکاربرد در صنعت ساختمان برای گچ‌کاری و تولید عناصر پیش‌ساخته استفاده می‌شود. به همین دلیل، استفاده از مواد کامپوزیت گچ به دلیل تطبیق‌پذیری و کاهش ضایعات در فرآیند پیش‌ساخته رواج یافته است [۳]. با این حال، یکی از چالش‌های عمده برای محققان امروزه بدون شک طراحی محصولات مبتنی بر گچ است که مواد خام ثانویه را در خود جای داده و رابطه بهینه‌ای بین خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های تولید شده ارائه می‌دهد [۴]. در حالی که گچ به دلیل ظرفیت تنظیم رطوبت عالی و مقرون به صرفه بودن شناخته شده‌اند. گچ که به عنوان دی هیدرات سولفات کلسیم ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) نیز شناخته می‌شود، به دلیل سهولت کاربرد، عملکرد عالی، و سازگاری با محیط زیست، یک ماده تکمیل‌کننده پرکاربرد در صنعت ساختمان می‌باشد [۵، ۶]. در کامپوزیت‌های گچ-لیگنوسلولزی، یکی از چالش‌های اصلی، بهبود چسبندگی بین فاز معدنی و لیگنوسلولزی، کاهش تخلخل، و افزایش انسجام ساختاری است. در این پژوهش، برای دستیابی به این هدف، نانوسلولز باکتریایی (BNCF) به عنوان یک تقویت‌کننده طبیعی مورد استفاده قرار گرفت. نانوسلولز با ساختار نانومقیاس فیبری خود، علاوه بر ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی با گچ و شلتوک برنج، باعث بهبود یکنواختی ساختاری، افزایش چسبندگی، کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها می‌شود. در مقایسه با نانو سیلیس که عمدتاً در ترکیبات سیمانی برای افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری آب استفاده می‌شود،

میلیون تن از انواع پسماندهای کشاورزی در ایران وجود دارد که اکثراً آنها بدون استفاده مشخص تقریباً هر ساله در مزارع رها و یا سوزانده می‌شوند که علاوه بر تخریب مواد آلی خاک، سبب آلودگی محیط زیست نیز می‌گردد [۱۶]. رایج ترین این نوع ضایعات پوسته برنج است، یک محصول جانبی کشاورزی که در طی فرآیند پوسته برداری برنج شلتوک ایجاد می‌شود. افزایش جمعیت در جهان مصرف برنج را روز به روز افزایش می‌دهد. تخمین زده می‌شود که ۵۰۰ میلیارد تن برنج در سراسر جهان تولید می‌شود و تقریباً ۲۰ درصد از این جرم را پوسته برنج تشکیل می‌دهد [۱۷]. پوسته برنج از ۳۰ تا ۴۰ درصد کربن و ۲۰ تا ۳۰ درصد سیلیس (SiO₂) تشکیل شده است. گچ همی هیدرات چسبنده‌ای است که در دماهای (۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) و با خشک شدن بسیار سریع تولید می‌شود [۱۸]. Binici و همکاران (2007) و Ashour و همکاران (2015) تأثیر افزودن گچ به کامپوزیت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند آنها به این نتیجه رسیدند، که می‌توان مقاومت مکانیکی نسبتاً پایین کامپوزیت‌ها را با استفاده از پایدارکننده‌های چسبنده به عنوان گچ بهبود بخشید [۱۹، ۲۰]. مطالعات نشان داد که افزودن گچ به کامپوزیت‌ها باعث کاهش هدایت حرارتی آنها می‌شود. از سوی دیگر، می‌توان محتوای گچ بهینه‌ای وجود داشته باشد که هدایت حرارتی گچ را به کمترین مقدار کاهش داد [۲۱]. سلولز باکتریایی می‌تواند در هر جایی که سلولز گیاهی استفاده می‌شود، به کار رود. این سلولز کاربردهای متعددی در رشته‌های مختلف دانش از جمله مهندسی عمران، بیوتکنولوژی، پزشکی، داروسازی، صنایع غذایی، علم مواد و غیره دارد. یکی از مهم ترین کاربردهای این سلولز ساخت انواع مختلف کامپوزیت‌ها می‌باشد. Mohammad kazemi و همکاران (2015) به ارزیابی اثر نانوسلولز باکتریایی بر خواص کامپوزیت‌های فیبر-سیمان و دوام در برابر چرخه ذوب-انجماد پرداختند. در تحقیق آنان اثر نانوسلولز باکتریایی در سه سطح (شاهد، پودر و ژل) به عنوان عوامل متغیر بودند. آنان به این نتیجه رسیدند که کامپوزیت‌های ساخته شده با ژل سلولز، مقاومت‌های خمشی، مقاومت چسبندگی داخلی و چقرمگی شکست بالاتری داشتند [۲۲]. Rangavar (2013) در پژوهشی امکان سنجی کاربرد ضایعات اسکناس باطله را در ساخت صفحات فشرده

نانوسلولز می‌تواند علاوه بر بهبود استحکام، به کنترل ویسکوزیته مخلوط، افزایش همگنی ساختار و کاهش نقص‌های سطحی کمک کند. بنابراین، انتخاب نانوسلولز باکتریایی در این پژوهش با هدف بهبود پیوندهای داخلی، افزایش مقاومت مکانیکی و بهینه‌سازی ساختار کامپوزیت‌های گچی انجام شده است. هدف اصلی تولید پانل‌های معدنی، ترکیب ذرات آلی مانند چوب و مواد لیگنوسلولزی با اتصال دهنده‌های معدنی از قبیل سیمان، گچ، منیزیم و غیره می‌باشد. کامپوزیت‌های الیاف-گچ دارای خواص کاربردی مطلوبی از قبیل مقاومت به عوامل جوی، آتش، خواص صداگیری، عایق حرارتی و عوامل بیولوژیکی بوده و همچنین از پایداری ابعادی بالایی برخوردارند. با وجود تمام این مزایا، گچ دارای محدودیت‌هایی از جمله شکنندگی و مقاومت کم در برابر آب است که آن را برای مصارف بیرونی مناسب نمی‌کند [۷، ۸]. محققان مختلف افزودن ضایعات صنعتی و کشاورزی را به عنوان پرکننده برای بهبود خواص مقاومت در برابر آب، شکنندگی و عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های مبتنی بر گچ گزارش کرده‌اند [۶، ۹]. پرکننده در مواد کامپوزیتی، به‌ویژه در تولید کامپوزیت‌های گچی، عمدتاً با هدف کاهش هزینه‌های تولید به ترکیب افزوده می‌شود، اما بسته به نوع و ویژگی‌های آن، می‌تواند تأثیر مثبتی بر برخی خواص مکانیکی و فیزیکی محصول نیز داشته باشد [۵، ۱۰]. ضایعات کشاورزی به عنوان پرکننده برای بهبود مدول گسیختگی، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری کامپوزیت‌های گچ استفاده شده است. همچنین الیاف ضایعات کشاورزی استحکام کششی بالاتر، ساینده‌گی کمتر و هزینه کمتری در مقایسه با انواع مواد تقویت‌کننده معدنی (پرکننده‌ها) دارند [۱۰، ۱۱، ۱۲]. کشاورزی یا مواد لیگنوسلولزی یک جایگزین بالقوه برای مواد چوبی جهت تولید اوراق فشرده چوبی می‌باشند که از نظر ترکیب شیمیایی و مورفولوژی الیاف شبیه مواد چوبی هستند [۱۳]. در کشاورزی مقادیر زیادی از محصولات جانبی در مزارع باقی می‌ماند که معمولاً از نظر حفاظت از محیط زیست و جنبه‌های اقتصادی به درستی مدیریت نمی‌شوند. تحقیقات نشان داده است که اکثراً پسماندهای کشاورزی ماده‌ای مناسب برای جایگزینی چوب‌های جنگلی جهت تولید اوراق فشرده چوبی هستند [۱۴، ۱۵]. مطابق برآوردهای صورت گرفته، بیش از ۲۵

تقویت ذرات الیاف نانوسلولز باکتریایی خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی تخته‌های کامپوزیت را بررسی می‌کند. هدف تعیین این است که آیا این کامپوزیت می‌تواند به عنوان یک مصالح ساختمانی قابل دوام در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

شلتوک برنج

در این تحقیق، شلتوک برنج از یک کارخانه شالیکوبی واقع در استان مازندران، شهر بابل جمع آوری شد. شلتوک‌ها پس از جمع‌آوری برای پردازش بیشتر به آزمایشگاه بتن دانشگاه ملی مهارت مازندران واحد امام صادق(ع) شهر امیرکلا منتقل شدند. ابتدا شلتوک برنج با استفاده از آب به طور کامل شسته شد تا زباله‌ها و ناخالصی‌ها از بین برود. سپس، شلتوک برنج در هوا خشک شد تا رطوبت کمتر از ۱۵٪ برسد. در نهایت، شلتوک‌های آماده شده برای جلوگیری از تبادل رطوبت قبل از اجرا در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شدند.

پودر گچ

سولفات کلسیم همی هیدرات با گرید تجاری $(CaSO_4 \cdot 0.5 H_2O)$ که به عنوان مصالح ساختمانی در (گچ ساختمانی) استفاده می‌شود، به عنوان عامل اتصال دهنده از شرکت امید، سمنان خریداری و در مطالعه حاضر استفاده شد. مشخصات شیمیایی (جدول ۱) و فیزیکی و مکانیکی (جدول ۲) آمده است.

الیاف-گچ ارزیابی کرده‌اند. در این تحقیق عوامل متغیر خرده‌های کاغذ اسکناس‌های باطله در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزن خشک خرده چوب و میزان گچ در سه سطح ۲/۵، ۲/۷۵ و ۳ برابر جرم خشک مواد چوبی بود. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش مقدار اسکناس باطله کاهش مقاومت‌های خمشی و چسبندگی داخلی در تخته‌ها بوجود آمد. همچنین او به این نتیجه رسید که افزایش میزان اسکناس و گچ سبب کاهش مقدار واکنشیدگی ضخامت و جذب آب تخته‌ها شد [۲۳]. Nazerian و همکاران (2016) در تحقیقی استفاده الیاف معدنی بر هیدراتاسیون و خواص تخته فیبر- گچ حاصل از الیاف کف و باگاس را ارزیابی کرده‌اند. آنان به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف کف در مقایسه با الیاف باگاس به دلیل مواد استخراجی کمتر، حرارت هیدراتاسیون بالاتر و مدت زمان هیدراتاسیون کمتری از خود نشان داد [۲۴]. Kamyab و Nazerian (2015) مقایسه‌ای بین خواص تخته‌های چوب گچ تولیدی با دو ماده لیگنوسولوزی حاصل از ضایعات باگاس و کاه گندم انجام دادند. آنان بیان کردند تخته‌هایی که از درصد بالاتری از ذرات باگاس ساخته شدند مقاومت بالاتری داشته‌اند [۲۵]. ویژگی‌های منحصر به فرد مواد در مقیاس نانو، سازگاری نانوذرات با ماتریس، ماده اتصال‌دهنده معدنی را بهبود می‌بخشد و به طور بالقوه اثرات منفی افزودنی‌های لیگنوسولوزی را در این زمینه کاهش می‌دهد. در نتیجه، این مطالعه با هدف بررسی تاثیر ترکیب ذرات شلتوک برنج در زمینه گچ و سپس ارزیابی چگونگی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر گچ

| حداقل مقاومت فشاری (MPa) | حداقل مقاومت خمشی (MPa) | حداکثر زمان تنظیم نهایی (دقیقه) | حداقل زمان تنظیم نهایی (دقیقه) | سفیدی (درصد) |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------|
| ۸/۲۹ | ۳/۰۷ | ۲۲ - ۲۵ | ۸ - ۱۰ | ۹۲/۲ |

از طریق سنتز باکتری در محیط کشت آبی استوایکتر زایلینوس به مدت ۲ هفته با خلوص $\geq 99\%$ درصد سنتز شدند (شکل ۱).

نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF)

الیاف نانوسلولز توسط شرکت دانش بنیان نانوبین (دانشگاه منابع طبیعی گرگان) تهیه شده است. نانوذرات

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مکانیکی پودر گچ

| ویژگی | مقدار (درصد) |
|--------------------------------|----------------|
| CaO | ۳۶/۱۹ |
| MgO | ۱/۷۳ |
| SiO ₂ | ۰/۹۹ |
| Fe ₂ O ₃ | ۰/۳۱ |
| Al ₂ O ₃ | ۰/۲۴ |
| NaCl | ۰/۰۵ |
| CO ₂ | ۰/۴۱ |
| SO ₃ | ۵۵/۳۴ |
| CaSO ₄ | ۹۱/۸۵ |
| آب هیدراسیون | ۴/۵۶ |

از طریق سنتز باکتری در محیط کشت آبی استوباکتر زایلینوس به مدت ۲ هفته با خلوص $\geq 99\%$ درصد سنتز شدند (شکل ۱).

نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF)

الیاف نانوسلولز توسط شرکت دانش بنیان نانوپین (دانشگاه منابع طبیعی گرگان) تهیه شده است. نانوذرات



شکل ۱- نانو الیاف سلولز باکتریایی مورد استفاده

دقیقه به مدت ۵ دقیقه) استفاده شد. و سپس سوسپانسیون طی ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بررسی گردید. پس از آماده سازی سوسپانسیون نانوسلولز، پودر گچ و شلتوک خرد شده به طور همگن در مخلوط کن آزمایشگاهی (۲۰۰۰ دور در دقیقه) با نسبت های ۱۰:۹۰، ۲۰:۸۰، و ۳۰:۷۰ (گچ به شلتوک) مخلوط شدند (شکل ۲ الف). سپس سوسپانسیون BCNF تهیه شده به تدریج به مخلوط اضافه شد و همچنین نسبت گچ با آب ۱:۱ بود (جدول ۳). همچنین، دانسیته هدف برای تمامی تیمارها برابر با ۱/۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب (معادل ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) در نظر گرفته شده است. پس از آماده سازی سوسپانسیون نانوسلولز باکتریایی، مقدار آب موجود در سوسپانسیون از کل میزان آب مورد نیاز برای مخلوط کم شد تا نسبت آب

روش ها

آماده سازی تخته کامپوزیت گچ

در مطالعه حاضر، گچ و شلتوک برنج به ترتیب به عنوان اتصال دهنده و پرکننده انتخاب شدند. فرآیند آماده سازی پانل های آزمایشی در شرایط استاندارد آزمایشگاهی انجام شد. ابتدا پد نانوالیاف سلولز باکتریایی (BNCF) به قطعات کوچک تقسیم شد و برای تهیه سوسپانسیون پایدار، در آب مقطر رقیق شد. سپس، این محلول تحت همزن مغناطیسی (۵۰۰ دور در دقیقه، ۱۰ دقیقه) قرار گرفت و با استفاده از دستگاه اولتراسونیک (دامنه ۵۰ درصد، زمان ۱۵ دقیقه، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز) پراکنده و پخش شد. برای افزایش یکنواختی و جلوگیری از تجمع ذرات، از هموژنایزر مکانیکی (۱۰۰۰۰ دور در

یک پرس سرد به ضخامت نهایی ۱۶ میلی‌متر رسید (شکل ۲ ب). پس از پرس سرد، تمام پانل‌ها (دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت 50 ± 5 درصد) به مدت هفت روز قبل از برش و آزمایش به حالت مطلوب رسیدند. سه پانل به عنوان تکرار برای هر متغیر ساخته شد، سپس خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آنها مورد بررسی قرار گرفت.



(ب)



(الف)

شکل ۲- دستگاه مخلوط کن آزمایشگاهی (الف)، تخته ساخته شده از شلتوک برنج و گچ (ب)

جدول ۳- نوع تیمار تحقیق برای ساخت تخته کامپوزیت شلتوک برنج-گچ

| کد نمونه | نسبت گچ (درصد) | نسبت شلتوک برنج (درصد) | مقدار آب (گرم) | نانو الیاف سلولز باکتریایی (درصد) | دانسیته (Kg/m^3) |
|----------|----------------|------------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| A | ۹۰ | ۱۰ | ۲۵۳۵ | ۰ | ۱۱۴۰ |
| B | ۸۰ | ۲۰ | ۲۲۵۳ | ۱ | ۱۱۵۰ |
| C | ۷۰ | ۳۰ | ۱۹۷۲ | ۱ | ۱۲۰۰ |
| D | ۹۰ | ۱۰ | ۲۵۳۵ | ۰ | ۹۵۰ |
| E | ۸۰ | ۲۰ | ۲۲۵۳ | ۱ | ۱۰۰۰ |
| F | ۷۰ | ۳۰ | ۱۹۷۲ | ۱ | ۱۱۰۰ |
| G | ۹۰ | ۱۰ | ۲۵۳۵ | ۰ | ۸۵۰ |
| H | ۸۰ | ۲۰ | ۲۲۵۳ | ۱ | ۹۰۰ |
| I | ۷۰ | ۳۰ | ۱۹۷۲ | ۱ | ۱۱۰۰ |

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی

واکشیدگی ضخامت

واکشیدگی ضخامت پس از غوطه‌وری ۲ و ۲۴ ساعته نمونه‌ها در آب مقطر بر اساس استاندارد EN 317 برای ارزیابی رفتار رطوبت‌سنجی کوتاه مدت کامپوزیت‌ها تعیین شد. بر اساس استاندارد، پس از آماده‌سازی، ضخامت نمونه‌های آزمایشی با ابعاد اسمی ۵۰ میلی‌متر \times ۵۰ میلی‌متر \times ۱۶ میلی‌متر به طور دقیق در وسط نمونه-

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی

مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE)

بر اساس استاندارد EN 310 انجام شد. تست چسبندگی داخلی (IB) نیز مطابق با استاندارد EN 319 انجام شد. آزمایش‌های مکانیکی با استفاده از دستگاه آزمون مکانیکی STM-600, Santam واقع در کارخانه آمل روکش با سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر در دقیقه انجام گرفت.

تبدیل فوریه طیف سنجی مادون قرمز (FTIR)

در این تحقیق، تجزیه و تحلیل طیف سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) در شرایط محیطی برای شناسایی و مشخص کردن گروه‌های شیمیایی موجود در تخته کامپوزیت گچی انجام شد. روش گلوله KBr (1:1000) برای جمع‌آوری طیف‌ها در محدوده عدد موج 4000 cm^{-1} تا 400 cm^{-1} با وضوح 2 cm^{-1} در حالت عبور استفاده شد. آزمایش‌های FTIR با استفاده از دستگاه IR-470 ساخت شرکت Shimadzu ژاپن انجام شد. این دستگاه از لامپ نرنست به‌عنوان منبع نور و دتکتور ترموکوپل برای تشخیص سیگنال‌ها استفاده می‌کند. تحلیل طیف‌ها با استفاده از نرم‌افزار IRsolution انجام شد. این آزمایش‌ها در مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک دانشگاه تهران انجام گرفت.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

ریز ساختار سطح شکست در کامپوزیت تخته گچی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تجزیه و تحلیل شد. برای این منظور، یک قطعه کوچک از نمونه (10 میلی‌متر \times 10 میلی‌متر) از سطح شکست جدا شد. نمونه‌ها بر روی نگهدارنده آلومینیومی قرار گرفتند و با طلا در محفظه خلاء 2 میلی‌آمپر به مدت 2 دقیقه پوشیده شدند. پس از آن، نمونه با استفاده از SEM مشاهده و تصویربرداری شد. این آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه JSM-840A ساخت شرکت JEOL ژاپن انجام گرفت. دستگاه از دتکتور الکترون‌های ثانویه استفاده کرده و ولتاژ شتاب‌دهنده آن بین 10 تا 20 کیلوولت تنظیم شد. حداکثر بزرگنمایی مورد استفاده در این مطالعه $300,000$ برابر بود. این بررسی‌ها در آزمایشگاه مرکزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران انجام شد.

آزمون‌های آماری

برای مقایسه آماری داده‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌های تخته کامپوزیت گچی، از نرم‌افزار آماری (SPSS) با استفاده از آنالیز ANOVA یک‌طرفه در سطح معنی‌داری $P < 0/05$ استفاده شد. همچنین گروه بندی میانگین‌ها نیز با آزمون چند دامنه دانکن (DMRT) انجام شد.

ها با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت $\pm 0/01$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و مقدار واکنش‌دهی ضخامت طبق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (1)$$

در آن: G_t واکنش‌دهی ضخامت (%)، t_1 ضخامت قبل غوطه‌وری (میلی‌متر) و t_2 ضخامت بعد غوطه‌وری (میلی‌متر)

دانسیته

دانسیته ظاهری نیز بر اساس نسبت جرم به حجم برای نمونه‌هایی با ابعاد اسمی 50 میلی‌متر \times 50 میلی‌متر \times 16 میلی‌متر مطابق استاندارد EN 323 اندازه‌گیری شد. یک کولیس دیجیتال با دقت $0/01$ میلی‌متر و یک تراز دیجیتال با دقت $0/001$ گرم به ترتیب برای ثبت حجم و جرم نمونه‌ها تطبیق داده شد. دانسیته نمونه‌ها بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد. از هر پانل سه نمونه آزمایشی به عنوان تکرار گرفته شد و در مجموع ۹ اندازه‌گیری برای هر متغیر گزارش شد.

$$\rho = \frac{m}{L \times W \times t} \times 10^6 \quad (2)$$

که در آن: ρ دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، m وزن (گرم)، t ضخامت (سانتی‌متر)، L طول (سانتی‌متر) و W عرض (سانتی‌متر)

افت جرم (عملکرد آتش)

افت جرم (عملکرد آتش) بر روی نمونه‌هایی با ابعاد 150 میلی‌متر \times 100 میلی‌متر \times 16 میلی‌متر بر اساس ISO 11925-3 (۲۰۲۰) انجام شد. از هر پانل ۶ نمونه مورد بررسی قرار گرفت و میانگین ۱۸ نمونه برای هر متغیر ثبت شد. نمونه‌های مورد آزمایش با منبع شعله در فاصله 30 میلی‌متری و 45 درجه از نمونه بر روی نگهدارنده ثابت شدند. فرآیند احتراق به مدت 120 ثانیه بر روی نمونه‌ها انجام شد و افت جرم با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$ML = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

که در آن: ML افت جرم (%)، W_1 وزن قبل از افت (گرم) و W_2 وزن بعد افت (گرم)

نتایج و بحث

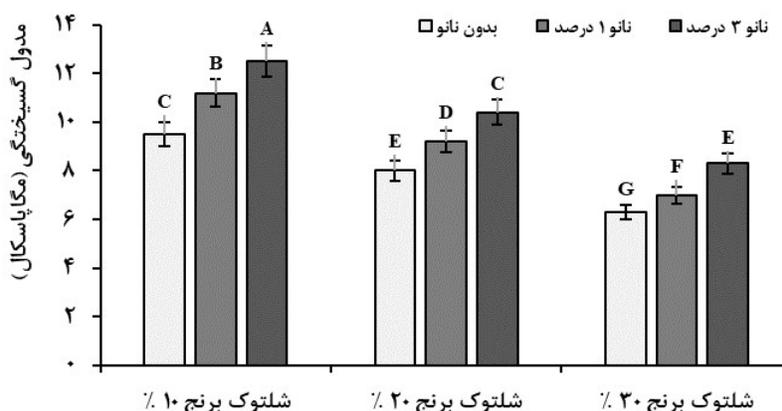
طیف سنجی مادون قرمز (FTIR)

تجزیه و تحلیل طیف سنجی فرسرخ تبدیل فوریه (FTIR) در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، با توجه به نتایج FTIR، نوارهایی در محدوده cm^{-1} ۳۵۴۴ تا ۳۴۰۶ به ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) مربوط هستند که می‌توانند از حضور آب ساختاری درون کریستال‌های گچ ناشی شوند. این آب کریستالی نقش مهمی در پایداری فیزیکی ساختار گچ دارد و نشان‌دهنده رطوبت درون ترکیب است. علاوه بر این، گروه‌های هیدروکسیل موجود در نانوالیاف سلولزی و شلتوک برنج نیز می‌توانند در این ناحیه سیگنال‌های مشخصی ایجاد کنند [۲۶]. پیوندهای cm^{-1} ۲۸۰۰ تا ۲۹۶۴ به ارتعاش پیوند کششی CH گروه‌های CH₂ و CH₃ مرتبط هستند. پیک‌هایی در cm^{-1} ۲۰۰۰ تا ۲۱۵۰، نشان‌دهنده حضور گروه‌های کربناته (CO_3^{2-}) در ساختار گچ هستند. این گروه‌ها می‌توانند در اثر فرآیندهای معدنی‌سازی تشکیل شده و به‌عنوان بخشی از فازهای معدنی گچ حضور داشته باشند. همچنین، این بازه می‌تواند نشان‌دهنده دی‌اکسید کربن جذب‌شده باشد که به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی در ساختار ترکیب شده است [۲۷]. تجزیه و تحلیل تنش‌ها در cm^{-1} ۹۸۰-۸۵۰ پیوندهای Ca-O و Mg-O را نشان می‌دهد [۲۸]. پیک cm^{-1} ۱۰۴۰ مربوط به ارتعاشات کششی S-O در سولفات‌های گچ است که نشان‌دهنده حضور این ترکیب معدنی می‌باشد. پیک cm^{-1} ۸۸۴ نیز به گروه‌های سولفات مرتبط است. در فرکانس‌های پایین‌تر، پیک‌های cm^{-1} ۵۲۵ و ۴۸۰ نشان‌دهنده ارتعاشات پیوندهای معدنی موجود در ساختار گچ هستند که به ترکیب بلوری آن مربوط می‌شوند [۲۹]. پیک‌های cm^{-1} ۸۵۰ و ۹۸۰ عمدتاً مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای S-O و O-S-O در یون‌های سولفات (SO_4^{2-}) موجود در گچ هستند. این گروه‌های عاملی بخش کلیدی ساختار گچ را تشکیل داده و تأییدکننده حضور آن در ترکیب کامپوزیت هستند. نوار در cm^{-1} ۳۴۵۵-۳۵۳۸ که به گروه OH نسبت داده می‌شود، ارتعاشات قوی ناشی از آب در ساختار را نشان می‌دهد. به طور کلی، پیک‌هایی در محدوده cm^{-1} ۱۱۴۵-

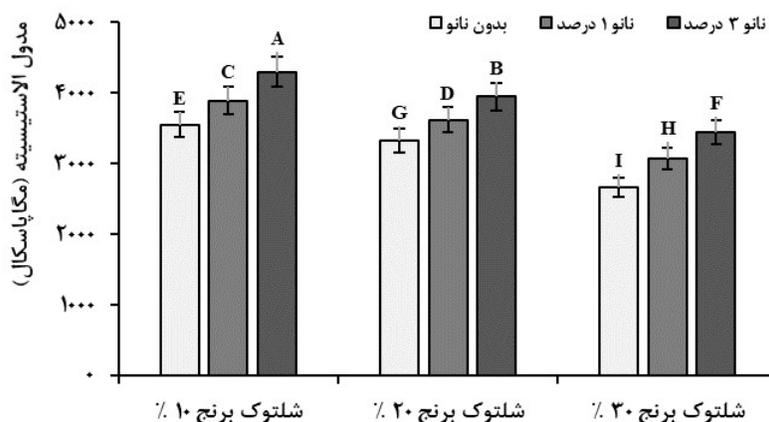
۱۱۶۲ پیک‌های این بازه علاوه بر حضور پیوندهای C-O و C-O-C در ساختار پلی‌ساکاریدها مانند سلولز و همی‌سلولز، می‌توانند به ارتعاشات C-O در یون‌های سولفات (SO_4^{2-}) نیز مربوط باشند. این موضوع نشان‌دهنده هم‌زیستی مواد آلی و معدنی در کامپوزیت است که موجب بهبود پیوند بین اجزای آن می‌شود. همچنین پیک cm^{-1} ۱۰۴۰ و ۱۱۵۰ این بازه به ارتعاشات کششی C-O در پلی‌ساکاریدها مربوط است که نشان‌دهنده حضور شلتوک برنج و نانو الیاف سلولز باکتریایی است. شلتوک برنج سرشار از سلولز و همی‌سلولز است که چنین پیک‌هایی را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، پیک‌های جذب cm^{-1} ۳۵۴۸، ۳۴۹۲، ۳۴۰۷، ۳۲۴۵ و ۱۷۵۰ در واقع به ارتعاشات کششی گروه‌های کربونیل (C=O) مربوط هستند. این گروه‌های عاملی می‌توانند از ترکیبات آلی موجود در شلتوک برنج، به‌ویژه گروه‌های کربوکسیل در زایلان همی‌سلولزهای آن ناشی شده باشند. علاوه بر این، حضور این پیک‌ها ممکن است نشان‌دهنده برهم‌کنش‌های هیدروژنی میان نانوالیاف سلولز باکتریایی و سایر اجزای آلی و معدنی در ساختار کامپوزیت باشد [۳۰]. پیک cm^{-1} ۱۶۴۰ در واقع مربوط به ارتعاشات خمشی پیوندهای O-H در آب جذب‌شده و پیوندهای هیدروژنی در ساختار کامپوزیت است. همچنین ممکن است مربوط به پیوندهای هیدروژنی در نانو الیاف سلولز باکتریایی باشد. نوارهای گسترده قابل توجهی در محدوده تعداد موج cm^{-1} ۳۴۵۳ تا ۳۱۵۳ و cm^{-1} ۱۶۶۰ تا ۱۶۳۰ به ترتیب برای کشش O-H و خمش O-H مشاهده شد [۳۱]. در این طیف، حضور پیک‌های مختلف از شلتوک برنج، گچ، و نانو الیاف سلولز باکتریایی نشان می‌دهد که این سه ماده به طور مؤثر با یکدیگر ترکیب شده‌اند. افزایش شدت پیک‌های مربوط به گروه‌های هیدروکسیل (O-H) و پیوندهای سلولزی (C-O) نشان‌دهنده نقش نانو الیاف در بهبود پیوند بین اجزای کامپوزیت است. حضور پیک‌های معدنی گچ در کنار پیک‌های آلی شلتوک و نانو الیاف نشان می‌دهد که ساختار کامپوزیت دارای ترکیبی هم‌زمان از مواد آلی و معدنی است که به پایداری و استحکام آن کمک می‌کند.

بسیار محدودی بین ذرات گچ و شلتوک حاصل شده است. در تحقیق حاضر نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو الیاف سلولز باکتریایی به تخته‌های کامپوزیت گچ، موجب بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی مانند مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و چسبندگی داخلی می‌شود. این بهبود به‌ویژه در ترکیب با ۳ درصد نانو الیاف بیشترین تأثیر را دارد. افزودن نانو الیاف به ترکیب‌ها باعث افزایش درگیری مکانیکی بین الیاف سلولزی و ماتریس گچ می‌شود که به‌طور مستقیم به افزایش مقاومت مکانیکی و بهبود پایداری ابعادی تخته‌ها منجر می‌گردد. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانو الیاف در بهبود ویژگی‌های ساختاری و عملکردی تخته‌های کامپوزیت گچ است.

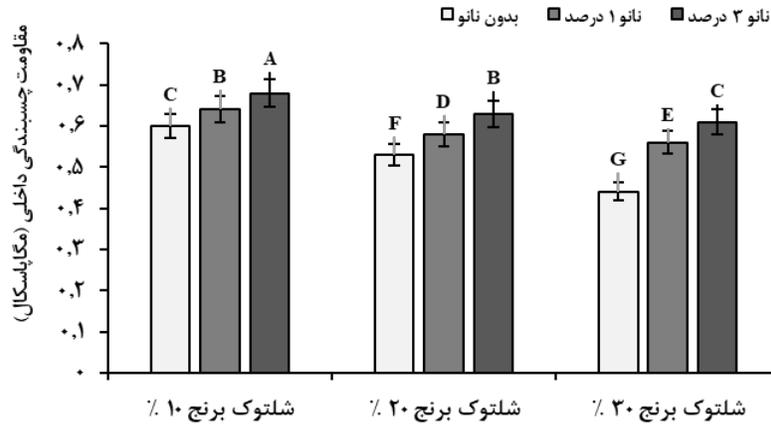
می‌شوند. بنابراین، هر چه محتوای الیاف بیشتر باشد، غلظت تنش در امتداد سطح مشترک ضعیف الیاف و گچ بیشتر می‌شود. استحکام کمتر باعث می‌شود که نمونه عملکرد ساختاری بهتری در امتداد الیاف دیگر داشته باشد. علاوه بر این، دلایل این یافته را می‌توان به بسیاری از حقایق دیگر مانند انقباض بین الیاف و گچ نسبت داد که تنش‌های برشی رابط را ایجاد می‌کند که منجر به جداسازی می‌شود. به عبارت دیگر، پارامتر اساسی در طراحی مواد کامپوزیت این است که باید بهینه سازی کسر حجمی الیاف به ماتریس وجود داشته باشد [۳۵]. با توجه به اینکه پیوندهای داخلی به شدت با استحکام پیوند اتصال همبستگی دارند، واضح است که اتصال مکانیکی



شکل ۴- تأثیر نسبت مخلوط شلتوک برنج، گچ و نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) بر مدول گسیختگی کامپوزیت‌ها



شکل ۵- تأثیر نسبت مخلوط شلتوک برنج، گچ و نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) بر مدول الاستیسیته کامپوزیت‌ها



شکل ۶- تأثیر نسبت مخلوط شلتوک برنج، گچ و نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) بر مقاومت چسبندگی داخلی کامپوزیت‌ها

داخل تخته باقی می‌ماند. در نتیجه واکنش‌دهی ضخامت را کاهش می‌دهد. اما شلتوک برنج به دلیل خاصیت آب دوستی، پایداری ابعادی تخته‌ها را کاهش داد (شکل ۷). شلتوک برنج در مقایسه با گچ، آب بیشتری جذب می‌کند. این موضوع به دلیل ساختار فیبری و متخلخل شلتوک برنج است که دارای مقدار زیادی سلولز و همی‌سلولز است که به‌طور طبیعی آب‌دوست هستند. در مقابل، گچ به‌عنوان یک ماده معدنی، آب را عمدتاً در فضاهای خالی بین کریستال‌های خود نگه می‌دارد و ظرفیت جذب آب آن در مقایسه با مواد لیگنوسولوزی کمتر است. در رابطه با دانسیته تخته‌ها، با افزایش ژل نانو سلولز باکتریایی از ۰ درصد به ۳ درصد در ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد شلتوک برنج، به ترتیب ۶/۱، ۱۵/۷ و ۲۹/۴ درصد افزایش یافته است (شکل ۸). نانو الیاف سلولز باکتریایی به دلیل سطح ویژه بالا و اندازه کوچکی که دارد سبب پر کردن خلل و فرج احتمالی درون تخته شده و راه ورود آب به داخل تخته را مسدود کرده، در نتیجه واکنش‌دهی ضخامت تخته را کاهش داده و دانسیته تخته را افزایش داده است. کاهش واکنش‌دهی ضخامت با وجود جذب آب نانو سلولز می‌تواند به دلایل افزایش انسجام ساختاری که نانو سلولز باعث کاهش فضاهای خالی در ساختار تخته شده و در نتیجه میزان نفوذپذیری آب کاهش یافته است. همچنین افزایش دانسیته کامپوزیت که با پر کردن منافذ و بهبود فشردگی، ساختار تخته کمتر در معرض تغییرات حجمی ناشی از جذب آب قرار گرفته است. و در نهایت واکنش‌دهی کنترل‌شده نانو سلولز که هرچند نانو سلولز آب جذب می‌کند، اما در محیط متراکم کامپوزیت، واکنش‌دهی آن به

ویژگی‌های فیزیکی تخته کامپوزیت گچ

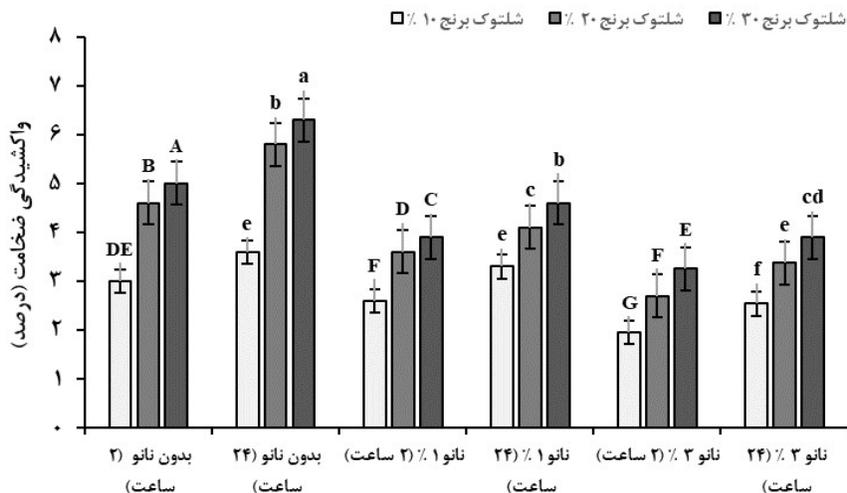
تأثیر درصد افزودن نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) بر درصد واکنش‌دهی ضخامت (۲ و ۲۴ ساعت) در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق با نتایج، درصد واکنش‌دهی ضخامت تخته‌ها با تغییر درصد افزودن نانو تغییر معنی‌داری داشته است. کمترین مقدار واکنش‌دهی ضخامت در هر دو حالت ۲ و ۲۴ ساعت در تخته‌هایی با اختلاط ۱۰ درصد شلتوک برنج، ۹۰ درصد گچ و با ۳ درصد نانو الیاف سلولز باکتریایی مشاهده شده است. نانو سلولز باکتریایی (BNCF) ذاتاً آبدوست است و توانایی بالایی در جذب آب دارد. اما در ساختار کامپوزیت، حضور آن به چند دلیل موجب کاهش جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت شده است: (۱) افزایش دانسیته کامپوزیت که نانو سلولز با توزیع یکنواخت در ماتریس گچی باعث پر شدن حفرات و فضاهای خالی شده که مسیرهای نفوذ آب را کاهش داده است. (۲) بهبود انسجام ساختاری که پیوندهای سطحی ایجاد شده بین نانو سلولز، گچ و شلتوک برنج منجر به افزایش اتصال بین اجزا و کاهش جذب آب کلی کامپوزیت شده است. (۳) کاهش جذب آب کل تخته که هرچند نانو سلولز به‌تنهایی آبدوست است، اما در ساختار متراکم و فشرده کامپوزیت، میزان آب در دسترس برای جذب توسط سایر اجزا کاهش می‌یابد و در نتیجه واکنش‌دهی ضخامت کمتر می‌شود. در تخته‌های حاوی نانو سلولز به دلیل توزیع یکنواخت نانو سلولز در ماتریس گچی و شلتوک برنج باعث فشردگی بیشتر کامپوزیت می‌شود و در نتیجه فضای خالی کمتری برای نفوذ آب به

نونسولوز خود خاصیت جذب آب دارد، اما در ساختار کامپوزیت، حضور آن موجب بهبود تراکم، کاهش مسیرهای نفوذ آب، و در نهایت کاهش واکنشیدگی ضخامت می‌شود. اما با این حال، در شلتوک‌های با درصد بالاتر (۳۰ درصد)، افزایش تخلخل به اندازه‌ای است که تأثیر نانو الیاف نیز نمی‌تواند به طور کامل اثرات افت جرم را کاهش دهد. با افزایش نانو سلولز باکتریایی، مقاومت تخته‌ها در برابر آتش کاهش یافت (شکل ۹). افت جرم زیر ۱ درصد نشان‌دهنده پایداری حرارتی و مکانیکی مناسب ترکیب شلتوک برنج، گچ و نانوالیاف سلولز باکتریایی است. گچ در دماهای معمولی پایدار بوده و آب تبلور خود را از دست نمی‌دهد. شلتوک برنج با داشتن سیلیس، پایداری ساختاری را افزایش داده و مانع از خروج مواد فرار می‌شود. نانوالیاف سلولزی نیز با ایجاد شبکه‌ای مستحکم، استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی را بهبود می‌بخشد. افزایش جزئی افت جرم با افزایش شلتوک برنج و نانوالیاف سلولزی احتمالاً به دلیل افزایش تخلخل است، اما همچنان در محدوده بسیار کم (زیر ۱ درصد) باقی مانده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد نانو الیاف سلولز باکتریایی (از ۰ درصد به ۳ درصد)، افت جرم به طور پیوسته افزایش می‌یابد. این روند در تمام نسبت‌های شلتوک به گچ (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) مشهود است. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش نسبت شلتوک برنج (از ۱۰ به ۳۰ درصد)، میزان افت جرم در هر درصد نانو الیاف سلولز باکتریایی بیشتر می‌شود. افزایش افت جرم با افزودن نانو الیاف سلولز باکتریایی ممکن است به چند دلایل باشد (۱) نانوالیاف سلولز باکتریایی (BNCF) به دلیل ساختار نانومتری و سطح ویژه بالا، قابلیت بالایی در جذب رطوبت دارند. با این حال، در ساختار کامپوزیت، تأثیر آن در کاهش واکنشیدگی ضخامت بیشتر به پر کردن فضاهای خالی و کاهش نفوذپذیری آب مربوط می‌شود تا کاهش جذب آب ذاتی نانسولوز. توزیع یکنواخت نانسولوز در ماتریس گچی موجب افزایش انسجام ساختاری و بهبود پیوند بین اجزا شده و مسیرهای نفوذ آب را کاهش داده است. این امر از واکنشیدگی ناهمگون تخته‌ها جلوگیری کرده و منجر به کاهش واکنشیدگی ضخامت و بهبود پایداری ابعادی کامپوزیت‌ها شده است. این ویژگی می‌تواند منجر به افزایش افت جرم به دلیل تغییرات رطوبتی و دمایی شود. در برخی

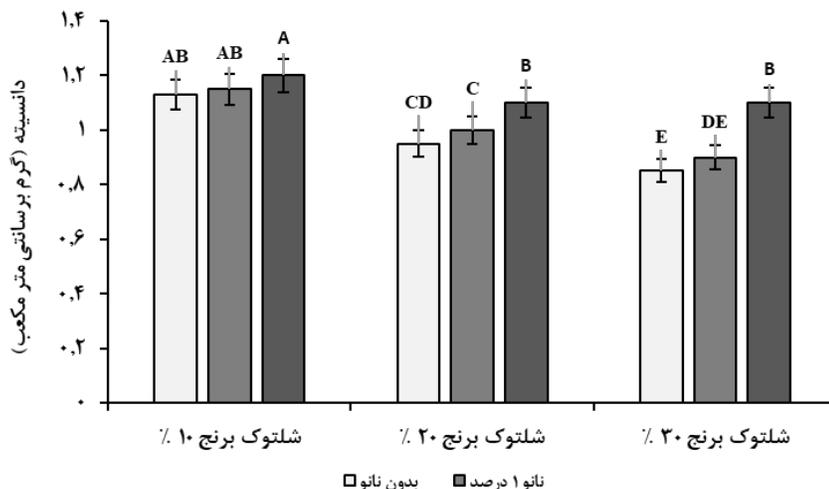
صورت یکنواخت توزیع شده و باعث واکنشیدگی موضعی و گسستگی ساختار نمی‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از مواد طبیعی مانند شلتوک برنج، به دلیل ساختار فیبری و متخلخل خود، می‌تواند باعث کاهش دانسیته و افزایش تخلخل شود. افزایش تخلخل در تخته‌ها به عنوان یکی از عوامل اصلی جذب آب و افزایش حساسیت به تغییرات محیطی شناخته شده است [۳۶]. ترکیب شلتوک و نانو الیاف یک ساختار پیچیده (برهم‌کنش همزمان بین سه جزء اصلی کامپوزیت گچ، شلتوک برنج و نانسولوز) ایجاد می‌کند. گچ یک ساختار معدنی با کریستال‌های سوزنی شکل ایجاد می‌کند که به تنهایی ساختار متخلخلی دارد. شلتوک برنج دارای ساختار فیبری و متخلخل است که دانسیته کلی تخته را کاهش می‌دهد. نانسولوز باکتریایی دارای ابعاد نانومتری است و به‌عنوان عامل تقویت‌کننده، با گچ و شلتوک برنج پیوند برقرار کرده و باعث بهبود انسجام ساختاری می‌شود. در نتیجه، ترکیب این سه جزء یک ماتریس با ترکیبی از پیوندهای فیزیکی و شیمیایی بین مواد آلی و معدنی ایجاد کرده است که ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی و پایداری ابعادی را بهبود می‌بخشد. اگرچه شلتوک به دلیل ماهیت متخلخل خود دانسیته را کاهش می‌دهد، نانو الیاف این اثر را تا حدی جبران می‌کنند. افزودن نانسولوز باکتریایی (BNCF) به ترکیب گچ-شلتوک برنج تأثیر قابل توجهی بر کاهش واکنشیدگی ضخامت دارد، اما این کاهش مستقیماً ناشی از کاهش جذب آب ذاتی نانسولوز نیست. نانسولوز باکتریایی به دلیل ساختار نانومتری و سطح ویژه بالای خود، متخلخل است و قابلیت جذب آب بالایی دارد. با این حال، تأثیر آن در کاهش واکنشیدگی ضخامت باید در چارچوب ساختار کامپوزیت بررسی شود. در حالی که شلتوک برنج دارای ساختار فیبری و حفرات بزرگ‌تر است که امکان جذب بیشتر آب را فراهم می‌کند، نانسولوز در ابعاد نانومتری با پراکندگی یکنواخت خود در ماتریس کامپوزیت، فضاهای خالی موجود در ساختار را پر کرده و از نفوذپذیری آب به داخل تخته جلوگیری می‌کند. این اثر موجب کاهش حفرات ماکروسکوپی و در نتیجه کاهش میزان جذب آب کلی کامپوزیت می‌شود. افزایش نانسولوز همچنین موجب افزایش انسجام ساختاری و بهبود چسبندگی بین اجزا شده که مانع از واکنشیدگی ناهمگون در اثر جذب آب می‌شود. بنابراین، اگرچه

۰ تا ۳۰ درصد وزنی، دانسیته نمونه‌های گچ کاهش می‌یابد و آن را به مواد سبک وزن تبدیل می‌کند که می‌توان از آن در کاربرد دیوارهای غیر باربر استفاده کرد. یکی از معایب مواد گچ ظرفیت جذب آب بالای آن است که می‌تواند با ادغام کاه برنج به دلیل ماهیت متخلخل کاه تشدید شود [۴۰]. در طی واکنش هیدراتاسیون گچ، الیاف به هیدرات‌ها متصل می‌شوند. با این حال، با کاهش نسبت الیاف و افزایش کریستال‌های دی هیدراته در مواد گچ چوب، فرآیند پیوند بهتر پیش می‌رود که باعث کاهش واکنشیدگی ضخامت تخته‌ها می‌شود [۳۵]. هرچه استحکام پیوند بین الیاف و گچ کمتر باشد، به دلیل پیوندهای داخلی کمتر، پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب، بازگشت بیشتر می‌شود. در تحقیق حاضر افزودن نانو الیاف سلولز باکتریایی به تخته‌های کامپوزیت گچ، تأثیرات مثبتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها داشته است. نتایج نشان‌دهنده افزایش دانسیته تخته‌ها به دلیل پر شدن خلل و فرج توسط نانو الیاف است که باعث فشردگی بیشتر کامپوزیت و در نتیجه کاهش واکنشیدگی ضخامت تخته‌ها می‌شود. این اثر در نمونه‌هایی با ۳ درصد نانو الیاف به بیشترین حد خود می‌رسد. از سوی دیگر، به دلیل خاصیت آب‌دوستی شلتوک برنج، افزایش درصد آن در تخته‌ها باعث افزایش تخلخل و کاهش پایداری ابعادی می‌شود، که به‌ویژه در نمونه‌های با درصد شلتوک بالاتر (۳۰ درصد) مشهود است. در نهایت، افزایش نانو الیاف سلولز باکتریایی می‌تواند موجب افزایش جذب رطوبت و افت جرم تخته‌ها شود، که این امر به دلیل ویژگی‌های خاص این الیاف و تأثیر آن بر ساختار تخته‌ها است.

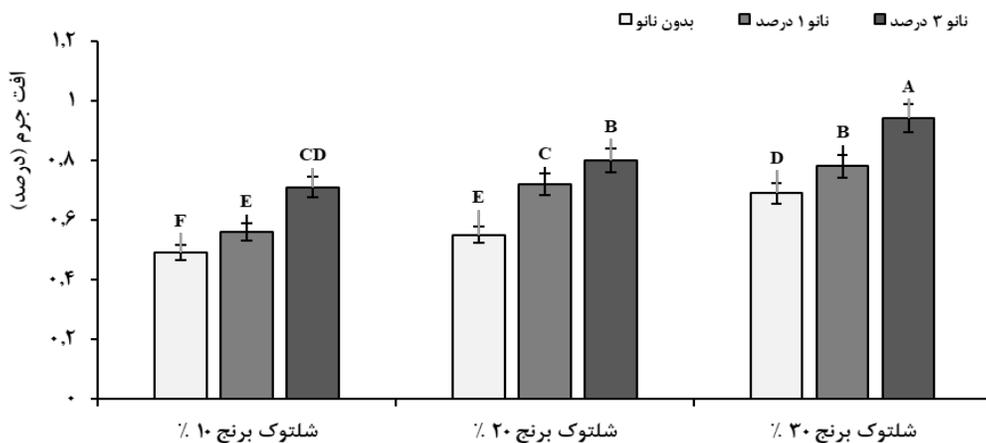
تحقیقات، نشان داده شده است که الیاف سلولزی می‌توانند به طور قابل توجهی جذب رطوبت را افزایش دهند که این ممکن است باعث تغییرات در ساختار فیزیکی مواد شود [۳۷]. (۲) ساختار نانو الیاف سلولز: نانو الیاف سلولز با سطح زیاد و خواص کششی و انعطاف‌پذیری، می‌توانند به شبکه ماتریس کامپوزیتی نفوذ کنند. در ترکیب‌های پلیمری، افزایش نانو الیاف به طور معمول به مقاومت ساختاری ماده می‌افزاید، اما در این حالت، ممکن است موجب تضعیف پیوندها و در نتیجه افزایش آسیب‌پذیری در برابر تغییرات رطوبتی و دمایی شود. (۳) توزیع نانو الیاف در ماتریس: اگر نانو الیاف به درستی در ماتریس توزیع نشوند، ممکن است موجب کاهش کیفیت ساختاری کامپوزیت شوند که باعث افزایش افت جرم منجر می‌شوند. این موضوع در برخی تحقیقات نیز گزارش شده است که توزیع نامناسب نانو الیاف می‌تواند به ضعف ساختاری و افزایش افت جرم منجر شود [۳۸]. (۴) اثر شلتوک برنج بر ساختار کامپوزیت: با افزایش درصد شلتوک برنج، ساختار کامپوزیت بیشتر به سمت مواد طبیعی متمایل می‌شود. شلتوک برنج که حاوی سیلیس است، می‌تواند به بهبود ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی کمک کند، اما در عین حال می‌تواند به دلیل ساختار گیاهی خود باعث افزایش تخلخل و جذب بیشتر رطوبت شود که در نهایت می‌تواند باعث افزایش افت جرم گردد. از طرفی دیگر نانو سلولز باکتریایی به دلیل انتقال حرارت بسیار کم و طبیعت ارگانیک، مقاومت تخته‌ها را در برابر آتش کاهش می‌دهد. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج حسن پور تیچی و رضوی همخوانی دارد [۳۹]. با افزایش میزان ضایعات کشاورزی از



شکل ۷- تأثیر نسبت مخلوط شلتوک برنج، گچ و نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) بر واکنش‌دهی ضخامت پس از ۲ ساعت و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب کامپوزیت‌ها



شکل ۸- تأثیر نسبت مخلوط شلتوک برنج، گچ و نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) بر دانسیته کامپوزیت‌ها



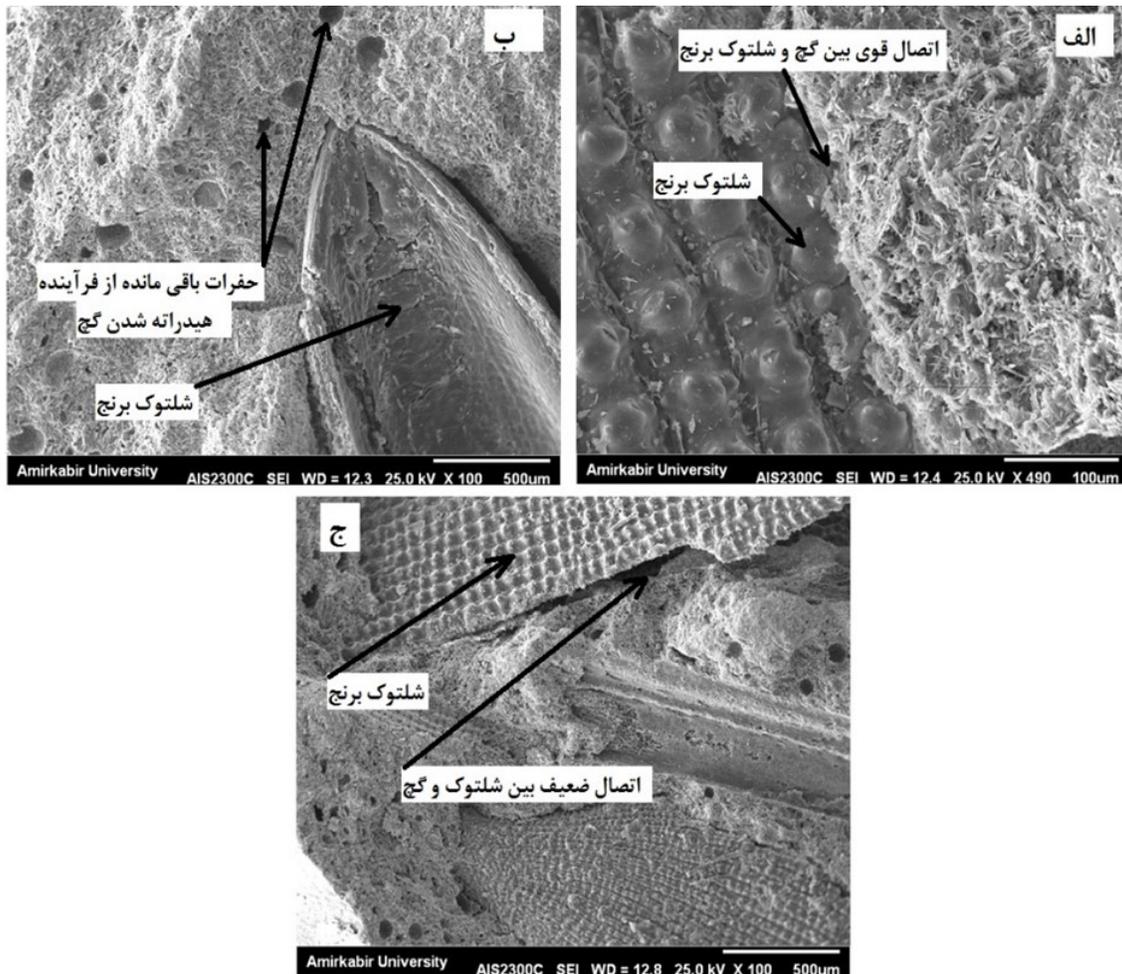
شکل ۹- تأثیر نسبت مخلوط شلتوک برنج، گچ و نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) بر مقاومت در برابر آتش کامپوزیت‌ها

تصاویر میکروسکوپی تخته کامپوزیت گچی

تحلیل‌های میکروسکوپی برای بررسی مکانیزم‌های تقویت خواص مکانیکی کامپوزیت گچ-شلتوک برنج انجام شد. تصاویر SEM با بزرگنمایی ۵۰۰ میکرومتر نشان داد که نانو الیاف سلولز باکتریایی (BNCF) باعث افزایش چسبندگی و بهبود انتقال تنش بین شلتوک برنج و ماتریس گچی می‌شود. این ترکیب همچنین زبری سطح شلتوک را کاهش داده و انسجام ساختاری را افزایش می‌دهد (شکل ۱۰).

افزایش تدریجی BNCF (۰ تا ۳ درصد) موجب بهبود پیوندهای داخلی، پر شدن فضاهای خالی، افزایش دانسیته و کاهش منافذ در تخته کامپوزیت شد. در نمونه‌های بدون

BNCF، وجود حفره‌ها و ترک‌های میکروسکوپی ناشی از گیرش گچ یا بارگذاری فشاری قابل مشاهده بود. این عوامل منجر به ضعف در استحکام کامپوزیت می‌شوند. استفاده از روش‌های پردازش ویژه مانند خلأ یا فشار بالا می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی شود. به‌طور کلی، ساختار گچی متخلخل بوده و دارای کریستال‌های سوزنی است که به‌صورت مکانیکی درهم قفل می‌شوند. پیوندهای مکانیکی، به‌عنوان عامل اصلی اتصال بین الیاف و ماتریس، در استحکام نهایی کامپوزیت تأثیرگذارند. افزایش بیش‌ازحد الیاف ممکن است جریان ماتریس را محدود کرده و بر استحکام اثر منفی بگذارد [۴۱، ۴۲، ۴۳].



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی از سطوح انکساری، الف: تخته‌های حاوی ۳٪ نانوسلولز باکتریایی، ب: تخته‌های حاوی ۱٪ نانوسلولز باکتری، ج: تخته‌های بدون نانو سلولز باکتریایی

نتیجه‌گیری

نانوسلولز نسبت به گچ بیشتر بوده و موجب کاهش نفوذپذیری آب و در نتیجه کاهش واکنشیدگی ضخامت می‌شود. افزودن نانوالیاف سلولز باکتریایی (BNCF) منجر به کاهش قابل توجهی در خاصیت دیرسوزی تخته‌ها شد. کاهش رسانایی حرارتی نانوسلولز موجب کاهش انتقال حرارت و در نتیجه کاهش مقاومت در برابر آتش در تخته‌های کامپوزیتی گچی گردید. از سوی دیگر، افزایش درصد کاه برنج در ساختار تخته‌ها باعث کاهش دانسیته کلی و در نتیجه افزایش تشکیل حفرات شد که این عامل تأثیر مستقیمی بر افزایش میزان افت جرم در تخته‌ها داشت. بررسی‌های میکروسکوپی (SEM) نشان داد که تخته‌های حاوی نانوسلولز دارای ساختار یکنواخت‌تری هستند و ترک‌ها و حفره‌های کمتری نسبت به نمونه‌های فاقد نانو دارند. تحلیل طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) نیز حاکی از بهبود پیوندهای شیمیایی و مکانیکی بین گچ و شلتوک برنج بود. به طور کلی، این تحقیق نشان داد که تخته‌های کامپوزیتی گچ-شلتوک برنج تقویت‌شده با نانوالیاف سلولز باکتریایی می‌توانند به عنوان جایگزینی پایدار برای مصالح ساختمانی سنتی در کاربردهای داخلی ساختمان و سازه‌های غیرباربر استفاده شوند.

در این مطالعه، شلتوک برنج که یک پسماند کشاورزی فراوان است، برای تولید تخته‌های کامپوزیتی با گچ و نانوالیاف سلولز باکتریایی مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که، افزایش خواص مکانیکی، از جمله مدول گسیختگی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE) و مقاومت چسبندگی داخلی (IB)، همبستگی مثبتی با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز باکتریایی (BNCF) در ساختار کامپوزیت دارد. این بهبود را می‌توان به افزایش دانسیته و توزیع یکنواخت ذرات در تخته، تحت تأثیر دمای هیدراتاسیون، نسبت داد. ترکیب بهینه که بالاترین خواص مکانیکی را ارائه می‌دهد شامل ۱۰ درصد کاه برنج، ۹۰ درصد گچ و ۳ درصد نانوالیاف سلولز باکتریایی است. میزان واکنشیدگی ضخامت در تخته ساخته شده از ۱۰ درصد کاه برنج، ۹۰ درصد گچ و ۳ درصد نانوالیاف سلولز باکتریایی پس از ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۲/۷۵ درصد و ۳/۳۴ درصد بود. با افزایش نانوالیاف سلولز باکتریایی از ۱ درصد به ۳ درصد، میزان واکنشیدگی ضخامت تخته‌ها کاهش یافت. علت این پدیده افزایش دانسیته در اثر حضور نانوسلولز است، زیرا دانسیته

منابع

- [5] Zhu, C., Zhang, J., Peng, J., Cao, W. and Liu, J., 2018. Physical and Mechanical Properties of Gypsum-Based Composites Reinforced with PVA and PP Fibers. *Constr Build Mater*, 163, 695–705, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.168
- [6] Khalil, A.A., Tawfik, A., and Hegazy, A.A., 2018. Plaster Composites Modified Morphology with Enhanced Compressive Strength and Water Resistance Characteristics. *Constr Build Mater*, 167, 55–64, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.165
- [7] Kondratieva, N., Barre, M., Goutenoire, F., and Sanytsky, M., 2017. Study of Modified Gypsum Binder. *Constr Build Mater*, 149, 535–542, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.140
- [8] Shim, H., and Choi, G., 2017. Study of Construction Convergence Technology for Performance Improvement in Functional Building Materials. *Journal of Building Engineering*, 11, 108–114, DOI: 10.1016/j.job.2017.04.008
- [9] Selamat, M.E., Hashim, R., Sulaiman, O., Kassim, M.H.M., Saharudin, N.I., and Taiwo, O.F.A., 2019. Comparative Study of Oil Palm Trunk and Rice Husk as Fillers in Gypsum Composite for Building Material. *Constr Build Mater*, 197, 526–532, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.003
- [1] Kang, C.W., Oh, S.W., Lee, T.B., Kang, W., and Matsumura, J., 2012. Sound Absorption Capability and Mechanical Properties of a Composite Rice Hull and Sawdust Board. *Journal of Wood Science*, 58, 273–278. DOI: 10.1007/s10086-011-1243-5
- [2] Pedreño-Rojas, M.A., Flores-Colen, I., De Brito, J., and Rodríguez-Liñán, C., 2019. Influence of the Heating Process on the Use of Gypsum Wastes in Plasters: Mechanical, Thermal and Environmental Analysis. *J Clean Prod*, 215, 444–457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.053
- [3] Vidales-Barriguete, A., Santa-Cruz-astorqui, J., Piña-Ramírez, C., Kosior-Kazberuk, M., Kalinowska-Wichrowska, K., and Atanes-Sánchez, E., 2021. Study of the Mechanical and Physical Behavior of Gypsum Boards with Plastic Cable Waste Aggregates and Their Application to Construction Panels. *Materials*, 14(9), 2255. DOI: 10.3390/ma14092255
- [4] Ferrández, D., Álvarez, M., Zaragoza-Benzal, A., Cobo-González, Á., and Santos, P., 2024. Development and Characterization of Innovative Hemp-Gypsum Composites for Application in the Building Industry. *Applied Sciences*, 14, 2229. DOI: 10.3390/app14062229

- [21] Antunes, A., Faria, P., Silva, V., Brás, A., and Antunes, A., 2019. Faria. Rice husk-earth based composites: A novel bio-based panel for buildings refurbishment. *Construction and Building Materials*, 221, 99-108, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.074
- [24] Mohammadkazemi, F., Doosthoseini, K., Ganjian, E., and Azin, M., 2015. Effects of Bacterial Nanocellulose on Properties of Fiber-Cement Composites and Durability to Freeze-Thaw Cycling. *Concrete Research*, 7, 47-56,
- [25] Rangavar, H., 2012. Study on the Possibility of Recycled-Banknote Utilization in the Production of Wood Gypsum Composite-Boards. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 4, 87-99. (In Persian), DOI:
- [26] Nazerian, M., Kamyab, M., and Kermaniyan, H., 2016. Application Effect of Mineral Fibers on Hydration and Properties of Gypsum-Bonded Fiberboard Manufactured from Kenaf and Bagasse Fibers. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 2, 203-228. (In Persian),
- [27] Nazerian, M., and Kamyab, M., 2013. Gypsum-Bonded Particleboard Manufactured from Agriculturally Based Material. *Forest Science and Practice*, 15, 325-331, DOI: 10.1007/s11632-013-0420-6
- [28] Prasad, P.S.R., Chaitanya, V.K., Prasad, K.S., and Rao, D.N., 2005. Direct Formation of the γ -CaSO₄ Phase in Dehydration Process of Gypsum: In Situ FTIR Study. *American Mineralogist*, 90, 672-678. DOI: 10.2138/am.2005.1742
- [29] Yalçın, O.U., and Kaya, A.İ., 2022. PROPERTIES OF GYPSUM PARTICLEBOARD WITH ADDED MINERAL DOLOMITE. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 24. DOI: 10.4067/S0718-221X2022000100428
- [30] YALÇIN, Ö.Ü., 2022. Evaluation of Various Properties of Gypsum Particleboards Reinforced with Olivine Mineral. *Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormançılık Dergisi*, 305-312. DOI: 10.18182/tjf.1142148
- [31] Ağan, S., Dana, A., and Aydinli, A., 2006. TEM Studies of Ge Nanocrystal Formation in PECVD Grown SiO₂:Ge/SiO₂ Multilayers. *Journal of Physics Condensed Matter*, 18, 5037-5045. DOI: 10.1088/0953-8984/18/22/004
- [32] Jeong, S.G., Chang, S.J., Wi, S., Kang, Y., Lee, H., and Kim, S., 2017. Development of Heat Storage Gypsum Board with Paraffin-Based Mixed SSPCM for Application to Buildings. *J Adhes Sci Technol*, 31, 297-309, DOI: 10.1080/01694243.2016.1215011
- [33] Mohd Basri, M.S., Mustapha, F., Mazlan, N., and Ishak, M.R., 2021. Rice Husk Ash-Based Geopolymer Binder: Compressive Strength, Optimize Composition, FTIR Spectroscopy, Microstructural,
- [10] Ramesh, M., Palanikumar, K., and Reddy, K.H., 2017. Plant Fibre Based Bio-Composites: Sustainable and Renewable Green Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 558-584, DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.094
- [11] Abuh, N.M., 2018. Umoh Palm Kernel Fruit Fiber Reinforced Gypsum-Cement Based Wall Panels: It's Physical and Mechanical Characteristics; Pollution, 1(2), 117-126,
- [12] Ashori, A., 2017. Hybrid Thermoplastic Composites Using Nonwood Plant Fibers. In *Hybrid Polymer Composite Materials: Properties and Characterisation*; Elsevier Inc, pp. 39-56 ISBN 9780081007884, DOI: 10.1016/B978-0-08-100787-7.00002-0
- [13] Eghtedarnejad, N., Kazemi-Najafi, S., and Shalbfafan, A., 2021. The effect of chipping method on the geometry of particles produced from date palm frond. *BioResources*, 16(1), 1131, DOI: 10.15376/biores.16.1.1131-1143
- [14] Hýsková, P., Hýsek, Š., Schönfelder, O., Šedivka, P., Lexa, M., and Jarský, V., 2020. Utilization of Agricultural Rests: Straw-Based Composite Panels Made from Enzymatic Modified Wheat and Rapeseed Straw. *Industrial Crops and Products | Journal*, 144, DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.112067
- [15] Dukarska, D., Rogoziński, T., Antov, P., Kristak, L., and Kmiecik, J., 2022. Characterisation of Wood Particles Used in the Particleboard Production as a Function of Their Moisture Content. *Materials*, 15, DOI: 10.3390/ma15010048
- [16] Mahdavi, S., 2019. Comparing the Characteristics of Non-Wood Waste for Energy Production. *Journal of wood and paper industries of Iran*, 4. (In Persian),
- [17] Kaplan, G., and Elmekahal, M.A.S., 2021. Microstructure and Durability Properties of Lightweight and High-Performance Sustainable Cement-Based Composites with Rice Husk Ash. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 52936-52962, DOI: 10.21203/rs.3.rs-337672/v1
- [18] Binici, H., Aksogan, O., and Shah, T., 2005. Investigation of Fibre Reinforced Mud Brick as a Building Material. *Constr Build Mater*, 19, 313-318, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.07.013
- [19] Binici, H., Aksogan, O., Bodur, M.N., Akca, E., and Kapur, S., 2007. Thermal Isolation and Mechanical Properties of Fibre Reinforced Mud Bricks as Wall Materials. *Constr Build Mater*, 21, 901-906, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004
- [20] Ashour, T., Korjenic, A., and Korjenic, S., 2015. Equilibrium Moisture Content of Earth Bricks Biocomposites Stabilized with Cement and Gypsum. *Cem Concr Compos*, 59, 18-25, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.005

- [40] Hasani, M., and Morteza, M., 2018. Mechanical Properties of Nanocellulose Reinforced Composite Materials. *Compos B Eng*, 141, 229–240,
- [41] Tichi, A.H., and Razavi, M., 2023. Construction of Cement Composite Using Walnut Shell Reinforced with Bacterial Nanocellulose Gel. *Bioresources*, 18, 8362–8373, DOI: 10.15376/biores.18.4.8362-8373
- [42] Singh, S., Maiti, S., Bisht, R.S., Balam, N.B., Solanki, R., Chourasia, A., and Panigrahi, S.K., 2022. Performance Behaviour of Agro-Waste Based Gypsum Hollow Blocks for Partition Walls. *Scientific Reports*, 12(1), 3204, DOI: 10.1038/s41598-022-07057-y.
- [43] Živica, V., Balkovic, S., and Drabik, M., 2011. Properties of Metakaolin Geopolymer Hardened Paste Prepared by High-Pressure Compaction. *Constr Build Mater*, 25, 2206–2213, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.004
- [44] Abir, N., Siddique, A.B., Begum, H.A., Gafur, M.A., Khan, A.N., and Mahmud, M.A., 2023. Effect of Fibre Loading on Mechanical Properties of Jute Fibre Bundle Reinforced Gypsum Composites. *Heliyon*, 9(7), DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18147
- [45] Mahmud, M.A., Belal, S.A., and Gafur, M.A., 2023. Development of a Biocomposite Material Using Sugarcane Bagasse and Modified Starch for Packaging Purposes. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1856–1874, DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.03.083
- and Potential as Fire-Retardant Material. *Polymers (Basel)*, 13, 4373, DOI: 10.3390/polym13244373
- [34] Vavřínová, N., Stejskalová, K., Teslík, J., Kubenková, K., and Majer, J., 2022. Research of Mechanical and Thermal Properties of Composite Material Based on Gypsum and Straw. *J Renew Mater*, 10, 1859–1873, DOI: 10.32604/jrm.2022.018908
- [35] Sahin, H., and Demir, İ., 2019. Atık Selülozik Karışımı Kaynaklardan Üretilen Alçı Esaslı Levhalar: 2. Bölüm. Kimyasal ve Teknolojik Özellikler. *European Journal of Science and Technology*, 77–85, DOI: 10.31590/ejosat.565258
- [36] Nindiyasari, F., Griesshaber, E., Zimmermann, T., Manian, A.P., Randow, C., Zehbe, R., Fernandez-Diaz, L., Ziegler, A., Fleck, C., and Schmahl, W.W., 2016. Characterization and Mechanical Properties Investigation of the Cellulose/Gypsum Composite. *J Compos Mater*, 50, 657–672, DOI: 10.1177/0021998315580826
- [37] Ramezani, H., Shahdab, S., and Nouri, A., 2012. Study on Effects of Wood Fiber Content on Physical, Mechanical, and Acoustical Properties of Wood-Fiber-Filled Gypsum Composites. *Materials Research*, 15, 236–241, DOI: 10.1590/S1516-14392012005000018
- [38] Reddy, N., and Yang, Y., 2005. Biofibers from Agricultural Byproducts for Industrial Applications. *Trends Biotechnol*, 23, 22–27. DOI: 10.1016/j.tibtech.2004.11.002
- [39] Nazari, M., and Ranjbar, N., 2015. Effect of Cellulose Nanofibers on the Physical and Mechanical Properties of Cement Composites. *Constr Build Mater*, 80, 1–10,