

## (OPEN ACCESS)

### Investigation of chemical and thermal modification of bamboo (*Phyllostachys vivax*) cell wall through spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM)

Masoud Kafi<sup>1</sup>, Rahmat Madandoust<sup>2\*</sup>, Heydar Dashti Nasserabadi<sup>1</sup> and Javad Torkaman<sup>3</sup>

1-Department of Civil Engineering, Cha. C., Islamic Azad University, Chalus, Iran

2\*- Correspond Author, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran,

Email: [rmadandoust@guilan.ac.ir](mailto:rmadandoust@guilan.ac.ir)

3-Department of Wood and Paper Industry, University of Guilan, Rasht, Iran

#### Article Info

##### Article type:

Full Length Research Paper

##### Article history:

Received: 7 November 2025

Revised: 25 December 2025

Accepted: 05 January 2026

Published online: 20 March

2026

##### Keywords:

Bamboo,  
electron microscopy,  
spectroscopy,  
swelling,  
water absorption.

#### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Cellulosic fibers particularly plant-based fibers have gained increasing importance as sustainable alternatives to synthetic materials in composite, automotive, and construction industries due to their renewability, low production cost, light weight, and favorable mechanical properties. Bamboo, characterized by its rapid growth, orderly fibrous structure, high strength, and biodegradability, represents a prominent resource for bio-composites. The bamboo cell wall is primarily composed of cellulose, hemicellulose, and lignin, with cellulose microfibrils embedded in a flexible hemicellulosic matrix within the primary wall. However, the intrinsic hydrophilicity and weak interfacial bonding of bamboo fibers pose major challenges in composite applications, necessitating chemical and thermal modification. This study aims to evaluate the effectiveness of boric acid ( $H_3BO_3$ ), sodium hydroxide (NaOH), and boiling-water treatments on the physical and structural properties of bamboo. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) were employed to characterize the modifications.

**Materials and Methods:** Bamboo samples (*Phyllostachys vivax*) were air-dried and cut into  $3 \times 3$  cm specimens. The samples were divided into four groups: untreated control, boiling-water treatment (6 h immersion), boric acid treatment (1 h immersion in 6% solution), and sodium hydroxide treatment (10 h immersion in 1% solution). Prior to treatment, samples were oven-dried at  $(103 \pm 2^\circ C)$ , and mass, volume, and density were recorded. Surface and thickness swelling were quantified using stereo-microscope images analyzed in Image J. Water absorption was measured at 24, 48, and 72 hours, and subsequently at weekly intervals up to four weeks. Molecular structural changes were assessed using FTIR, and microstructural variations were examined through SEM imaging.

**Results:** Physical assessments revealed that control samples exhibited moderate reductions in mass (8.38%) and volume (3.91%) after oven-drying. Samples treated with boiling water and NaOH showed increased density due to substantial mass and volume loss associated with extractive degradation. In contrast, boric acid treatment resulted in lower mass loss and a notable 6.80% increase in volume, leading to reduced density. After 28 days of immersion, all chemical and thermal treatments increased

water absorption. Boric acid treatment exhibited the highest water uptake due to the hygroscopic nature of boron, whereas NaOH treatment showed increased porosity resulting from lignin and hemicellulose removal. Regarding swelling, boiling-water and NaOH treatments increased swelling, while boric acid treatment effectively reduced it through the formation of cross-linking bonds. FTIR analysis indicated that NaOH treatment degraded hemicellulose and lignin. In the boric acid spectrum, a reduction in hydroxyl peak intensity and the emergence of new B–O cross-linking bands were observed. SEM images confirmed a compact structure in the control sample, slight porosity in the boiling-water treatment, boron deposition in the boric acid treatment, and pronounced porosity in the NaOH treatment. These observations clearly demonstrated the role of boric acid in producing high water absorption but low swelling, and the role of NaOH in generating high swelling yet improved fiber–matrix adhesion.

**Conclusion:** This study demonstrates that chemical and thermal treatments effectively alter the bamboo cell-wall structure. Boric acid treatment, despite increasing water absorption, significantly reduces swelling and provides desirable dimensional stability for structural applications of bamboo—particularly as reinforcement in concrete. Conversely, NaOH treatment increases swelling and porosity but enhances fiber–matrix adhesion in composites. These findings, supported by spectral and microscopic analyses, address the challenges associated with the hydrophilicity of plant fibers and highlight the strong potential of bamboo in bio-composite applications. Future research should focus on optimizing combined treatments and evaluating the industrial performance of treated bamboo products.

**Cite this article:** Masoud Kafi, Rahmat Madandoust, Heydar Dashti Nasserabadi and Javad Torkaman. 20260. Investigation of chemical and thermal modification of bamboo (*Phyllostachys vivax*) cell wall through spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 40(4), 92-111. DOI: [http://doi.org/ 10.22092/ijwpr.2026. 371327.1819](http://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.371327.1819)



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijwpr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

## بررسی اصلاح شیمیایی و حرارتی دیواره سلولی گیاه بامبو (*Phyllostachys vivax*) از طریق طیف‌سنجی (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی (SEM)

مسعود کافی<sup>۱</sup>، رحمت مدن دوست<sup>۲\*</sup>، حیدر دشتی ناصرآبادی<sup>۱</sup> و جواد ترکمن<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

۲- نویسنده مسئول، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، پست الکترونیک: [rmadandoust@guilan.ac.ir](mailto:rmadandoust@guilan.ac.ir)

۳- گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: الیاف سلولزی، به‌ویژه الیاف گیاهی، به دلیل ویژگی‌هایی مانند تجدیدپذیری، هزینه پایین تولید، وزن سبک و خواص مکانیکی مناسب، به‌عنوان جایگزین‌هایی پایدار برای مواد مصنوعی در صنایع کامپوزیت، خودروسازی و ساختمان‌سازی اهمیت یافته‌اند. گیاه بامبو با رشد سریع، ساختار فیبری منظم، استحکام بالا و زیست‌تخریب‌پذیری، منبعی برجسته برای کامپوزیت‌های زیستی است. دیواره سلولی بامبو عمدتاً از سلولز، همی‌سلولز و لیگنین تشکیل شده است که میکروفیبریل‌های سلولز در ماتریکس انعطاف‌پذیر همی‌سلولز در لایه اولیه دیواره قرار دارد. با این حال، آب‌دوستی ذاتی و چسبندگی ضعیف الیاف بامبو، چالش‌های مهمی را در کاربردهای کامپوزیتی ایجاد می‌کند که نیازمند اصلاحات شیمیایی و حرارتی است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثربخشی روش‌های تیمار اصلاحی شامل اسید بوریک ( $H_3BO_3$ )، سود (NaOH) و آب جوش بر خواص فیزیکی و ساختاری بامبو است. برای ارزیابی دقیق نتایج، از روش‌های طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است.
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹	مواد و روش‌ها: نمونه‌های بامبو ( <i>Phyllostachys vivax</i> ) پس از خشک شدن در هوای آزاد به قطعات با ابعاد $3 \times 3$ سانتی‌متری تقسیم شدند. نمونه‌ها در چهار گروه شاهد، تیمار با آب جوش (۶ ساعت غوطه‌وری در آب جوش)، اسید بوریک (۱ ساعت غوطه‌وری در محلول اسید بوریک ۶ درصد) و سود (۱۰ ساعت غوطه‌وری در محلول سود ۱ درصد) دسته‌بندی شدند. قبل از تیمار، نمونه‌ها در آون در دمای $2 \pm 103$ سانتی‌گراد خشک شده و جرم، حجم و جرم مخصوص آنها اندازه‌گیری شد. درصد واکشیدگی سطح و ضخامت با استفاده از تصاویر میکروسکوپ استریو و نرم‌افزار <i>Image-J</i> محاسبه گردید. درصد جذب آب در فواصل زمانی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت و بعد هفتگی تا ۴ هفته اندازه‌گیری شد. تغییرات ساختار مولکولی با FTIR و ریزساختار نمونه‌ها با تصاویر SEM مقایسه گردید.
واژه‌های کلیدی: بامبو، جذب آب، طیف‌سنجی، واکشیدگی، میکروسکوپ الکترونی.	نتایج: بررسی‌های فیزیکی نشان داد که نمونه‌های شاهد پس از خشک شدن در آون، کاهش متوسطی را در جرم ( $38\%$ ) و حجم ( $91\%$ ) تجربه کردند. نمونه‌های تیمار شده با آب جوش و هیدروکسید سدیم به دلیل کاهش چشمگیر حجم و جرم ناشی از تجزیه مواد استخراجی، افزایش چگالی نشان دادند. در مقابل، تیمار اسید بوریک با کاهش جرم کمتر و افزایش حجم $80\%/6$ همراه بود که منجر به کاهش چگالی گردید. نتایج جذب آب پس از ۲۸ روز غوطه‌وری نشان داد که تمامی تیمارهای حرارتی و شیمیایی، درصد جذب آب را افزایش داده‌اند. تیمار بوریک اسید به دلیل خاصیت رطوبت‌جذبی بور، بیشترین جذب آب و تیمار سود به دلیل حذف لیگنین و همی‌سلولز، افزایش تخلخل را نشان دادند. در مورد واکشیدگی، تیمارهای آب جوش و سود آن را افزایش دادند، اما تیمار بوریک اسید به دلیل تشکیل پیوندهای عرضی، درصد واکشیدگی را به‌طور مؤثری کاهش داد. نتایج FTIR نشان داد که هیدروکسید سدیم باعث تخریب همی‌سلولز و لیگنین شده است. در طیف اسید بوریک، کاهش

شدت پیک گروه هیدروکسیل و ظهور پیک‌های جدید مربوط به پیوندهای عرضی B-O مشاهده شد. تصاویر SEM، ساختار فشرده در نمونه شاهد و به ترتیب افزایش جزئی تخلخل در آب جوش، رسوب بور در تیمار اسید بوریک و تخلخل بالا در تیمار هیدروکسید سدیم را تأیید کردند. این مشاهدات، تأثیر اسید بوریک در جذب آب بالا و واکنش‌دهی کم و تأثیر هیدروکسید سدیم در واکنش‌دهی زیاد و چسبندگی بهتر را به‌خوبی نشان دادند.

نتیجه‌گیری: این پژوهش ثابت کرد که تیمارهای شیمیایی و حرارتی به‌طور مؤثری ساختار دیواره سلولی بامبو را تغییر می‌دهند. تیمار اسید بوریک با کاهش چشمگیر واکنش‌دهی (با وجود افزایش جذب آب)، پایداری ابعادی مطلوبی را برای کاربردهای سازه‌ای بامبو (به‌عنوان مسلح‌کننده) در بتن فراهم می‌کند. در مقابل، هیدروکسید سدیم با افزایش واکنش‌دهی و تخلخل، چسبندگی الیاف به ماتریس کامپوزیت را بهبود می‌بخشد. این نتایج به‌طور جامع توسط آنالیزهای طیفی و میکروسکوپی تأیید شدند. این یافته‌ها چالش‌های آب‌دوستی الیاف گیاهی را برطرف کرده و ظرفیت بالای بامبو را در کامپوزیت‌های زیستی برجسته می‌کنند. تحقیقات آینده باید بر ترکیب بهینه تیمارها و ارزیابی صنعتی محصولات تمرکز کند.

استناد: مسعود کافی، رحمت مندوست، حیدر دشتی ناصرابادی و جواد ترکمن. ۱۴۰۵. بررسی اصلاح شیمیایی و حرارتی دیواره سلولی گیاه بامبو (*Phyllostachys vivax*) از طریق طیف‌سنجی (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی (SEM). نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۱(۱)، ۹۲-۱۱۱.

DOI: <http://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.371327.1819>

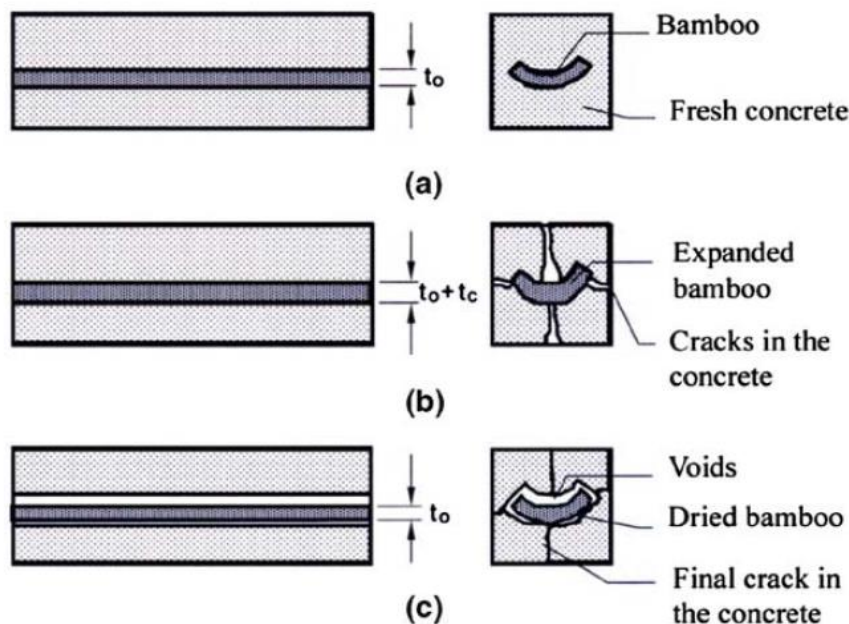
## مقدمه

الیاف سلولزی به دلیل قابلیت تجدیدپذیری، هزینه تولید پایین، وزن کم و خواص مکانیکی مناسب، جایگزینی ارزشمند برای مواد مصنوعی و آلاینده در صنایع مختلف به شمار می‌روند (Lee et al., 2020). استفاده روزافزون از الیاف گیاهی در تولید کامپوزیت‌ها، به‌ویژه در صنایع خودروسازی، ساختمان‌سازی و مواد زیست‌پایه، نشان‌دهنده اهمیت این الیاف در حرکت به‌سوی مواد کم‌کربن و سازگار با محیط‌زیست است (Elseify et al., 2021).

بامبو به دلیل رشد سریع، ساختار فیبری منظم، ترکیب شیمیایی مناسب، نسبت بالای استحکام به وزن، زیست‌تخریب‌پذیری و مقاومت کششی بالا، یکی از برجسته‌ترین منابع برای تولید کامپوزیت‌های زیستی محسوب می‌شود (Behera et al., 2025; Mahanto & Pradhan, 2021). دیواره سلولی اولیه بامبو عمدتاً از سلولز، پکتین و همی سلولز ساخته شده و در حفظ یکپارچگی ساختاری نقش دارد (Cheng et al., 2023). دیواره سلولی

ثانویه نیز با حضور سلولز و لیگنین، سختی و مقاومت مکانیکی بیشتری ایجاد می‌کند (Xu et al., 2022). با این حال، آب‌دوستی و چسبندگی ضعیف الیاف به ماتریس‌های پلیمری از چالش‌های مهم در کاربردهای مهندسی مواد است (Karimah et al., 2021; Zwawi, 2021).

در دو دهه اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای برای ارتقای خواص مکانیکی الیاف طبیعی و بهبود چسبندگی آن‌ها با ماتریس‌های سیمانی و پلیمری انجام شده است. تیمارهای شیمیایی با حذف ترکیبات غیرسلولزی، مقاومت کششی را افزایش داده و زبری سطح الیاف را بیشتر می‌کنند (Ghavami, 2005). بامبو نیز به دلیل خواص منحصر به فرد خود به‌عنوان تقویت‌کننده در بتن مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، استفاده از بامبو بدون تیمار می‌تواند موجب جذب آب، تورم مقطع و ایجاد ترک در بتن شود (شکل ۱) (Yadav & Mathur, 2021; Javadian et al., 2016).



شکل ۱- رفتار بامبوی تیمار نشده به عنوان تقویت کننده در بتن: (a) بامبو در بتن تازه، (b) بامبو در هنگام عمل آوری بتن و (c) بامبو پس از عمل آوری بتن (Ghavami, 2005).

Figure 1. Behavior of untreated segment bamboo as reinforcement in concrete: bamboo in fresh concrete (a), bamboo during curing of concrete (b) and bamboo after cured concrete (c) (Ghavami, 2005).

بهبود می بخشد (Guo et al., 2021; Wang et al., 2025; Hill et al., 2021).

با وجود مزایای فراوان بامبو، محدودیت‌هایی مانند آب دوستی و چسبندگی ضعیف به ماتریس‌ها، بهره‌برداری از آن را با چالش مواجه کرده است؛ بنابراین، اصلاح ساختار دیواره سلولی برای رفع این کاستی‌ها ضروریست. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر سه نوع تیمار شامل هیدروکسید سدیم، اسید بوریک و تیمار حرارتی با آب جوش بر ساختار و ترکیبات شیمیایی دیواره سلولی بامبو است. همچنین پایداری ابعادی بامبو در محیط‌های مرطوب به عنوان عامل مسلح کننده در بتن ارزیابی می‌شود.

روش‌های مورد استفاده شامل سنجش میزان جذب آب، واکنشیدگی دیواره سلولی، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) و تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی

روش‌های اصلاح شیمیایی مانند تیمار با هیدروکسید سدیم، لیگنین و همی سلولز را حذف کرده و زبری سطح الیاف را افزایش می‌دهند. این تغییرات موجب بهبود اتصال میان الیاف و زمینه پلیمری می‌شود (Geremew et al., 2024; Chen et al., 2025). همچنین استفاده از ترکیبات معدنی مانند بور، بوراکس و اسید بوریک، دوام و مقاومت بامبو را در برابر عوامل تخریبی افزایش داده و از رشد قارچ‌ها و باکتری‌ها جلوگیری می‌کند (Liu, 2023; Mwanja et al., 2024).

علاوه بر این، تیمار حرارتی با آب جوش نیز به عنوان روشی مؤثر شناخته شده است. مطالعات نشان داده‌اند که حرارت موجب کاهش گروه‌های هیدروکسیل و تخریب همی سلولز می‌شود. این تغییرات ساختاری آب دوستی الیاف را کاهش داده و عملکرد آن‌ها را در کاربردهای مهندسی مواد

$$D = \frac{M}{V} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$D = \text{جرم حجمی (gr/cm}^3\text{)} ; M = \text{جرم (gr)} ; V = \text{حجم (cm}^3\text{)}$$

#### تیمار نمونه‌ها

تیمار نمونه‌ها مطابق شکل ۲ در چهار گروه و سه تکرار، شاهد (c)، تیمار با آب جوش (a)، تیمار با اسیدبوریک (b) و تیمار با هیدروکسید سدیم (d) انجام شد. جرم، حجم و جرم حجمی نمونه‌ها در حالت خشک پس از تیمار اندازه‌گیری شد.

#### روش تیمار

برای تیمار با آب جوش، نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در یک بشر حاوی آب مقطر در حال جوش قرار داده شدند. در هنگام کار برای جبران آب جوش بخار شده به ظرف حاوی نمونه‌های در حال جوشیدن آب اضافه شد (Shu-nong et al., 2023).

برای تیمار با اسید بوریک ( $H_3BO_3$ )، ابتدا محلول اسید بوریک ۶ درصد تهیه و دمای آن به ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد، سپس نمونه‌ها در محلول اسید بوریک ۶ درصد به مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون قرار داده شدند (Yusof et al., 2023).

برای تیمار با هیدروکسید سدیم (NaOH)، نمونه‌ها به محلول آماده شده هیدروکسید سدیم یک درصد که از قبل به دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد رسیده بود اضافه شدند و به مدت ۱۰ ساعت در داخل آون قرار داده شدند. در هنگام کار، با اضافه کردن محلول ساخته شده ۷۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش ناشی از تبخیر جبران گردید (Wu et al., 2023).

روشنی (SEM) است. این رویکرد چندوجهی امکان تحلیل دقیق تغییرات ساختاری و مولکولی دیواره سلولی را فراهم می‌سازد و زمینه درک بهتر رفتار فیزیکی و شیمیایی الیاف گیاهی تحت فرایندهای اصلاحی را ایجاد می‌کند.

#### مواد و روش‌ها

##### نمونه‌برداری

نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق از گیاه بامبوی سه ساله (*Phyllostachys vivax*) از مزرعه‌ای واقع در شهرستان لاهیجان، استان گیلان، انتخاب شدند. گیاه بامبو در این مرحله از رشد، خواص مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به سایر مراحل رشد دارد (Lee et al., 2022). به منظور ارتقاء ویژگی‌های ساختاری و کاهش رطوبت آزاد، بامبوها برای مدت یک ماه در سایه و در دمای طبیعی محیط خشک شدند (Chen et al., 2022). برای تهیه نمونه قطعاتی به ابعاد ۳×۳ سانتیمتر از ناحیه نزدیک به یقه ساقه گیاه بامبو به وسیله اره دستی برش داده شد. سپس جرم، حجم و جرم حجمی نمونه‌ها قبل از هرگونه تیمار نمونه‌ها تعیین گردید. جرم توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم، حجم با استفاده از یک استوانه مدرج با دقت ۰/۱۰ میلی‌لیتر و جرم حجمی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری حجم نمونه، میزان آبی که توسط نمونه در هنگام غوطه‌وری در استوانه مدرج جذب شد، با اندازه‌گیری اختلاف وزن نمونه پیش و پس از قرارگیری درون استوانه، مقدار آب جذب شده تعیین و به حجم آب جابجا شده افزوده شد تا حجم واقعی نمونه با دقت بیشتری محاسبه شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون با دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد خشک شدند و دوباره جرم، حجم و جرم حجمی نمونه‌ها این بار در حالت خشک تعیین شد.



شکل ۲- تصویر نمونه‌های تیمار شده (a) آب جوش، (b) اسیدبوریک، (c) شاهد و (d) هیدروکسید سدیم

Figure 2. Image of treated samples of Boiling Water (a), Boric acid (b), Control (c) and Sodium hydroxide (d)

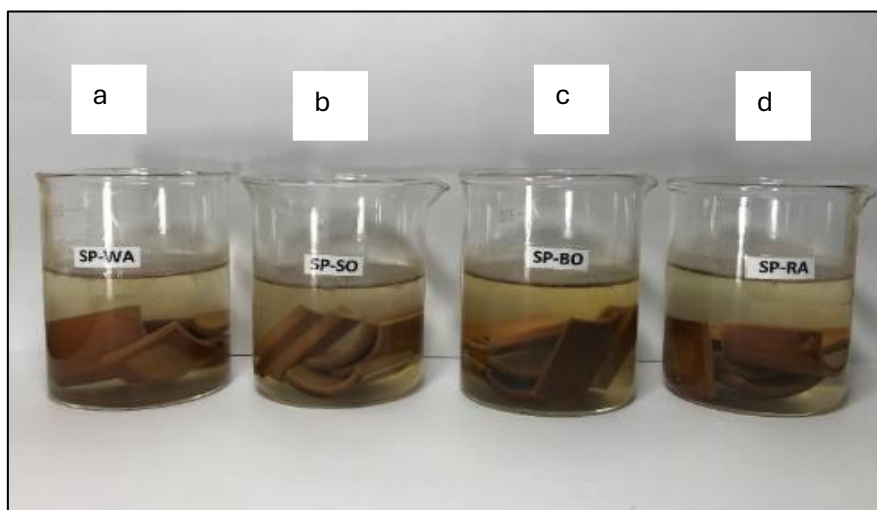
آب با رابطه ۲ محاسبه و یادداشت شد. بررسی‌ها در چهار گروه و در هر گروه با ده تکرار انجام شد.

$$H = \frac{Wh - Wo}{Wo} \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

$H$  = درصد جذب آب ;  $Wh$  = وزن مرطوب (gr) ;  $Wo$  = وزن خشک ( $cm^3$ )

### اندازه‌گیری جذب آب

نمونه‌های تیمار شده و تیمار نشده به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون با دمای  $103 \pm 2$  سانتی‌گراد قرار داده شدند، پس از آن جرم، حجم و جرم حجمی نمونه‌ها در حالت خشک اندازه‌گیری شد. سپس تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب مقطر به صورت غوطه‌ور قرار داده شدند (شکل ۳) و در فواصل زمانی ۲۴، ۴۸، ۷۲ ساعت و بعد یک هفته، دو هفته، سه هفته و چهار هفته مقدار جرم اندازه‌گیری و درصد جذب

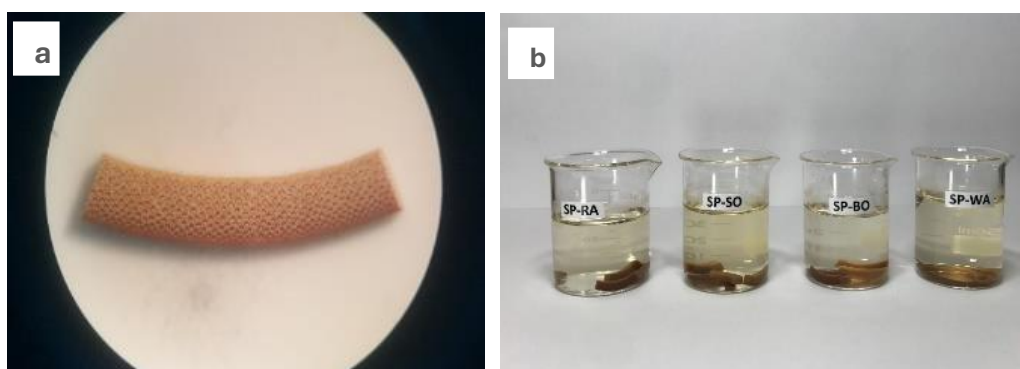


شکل ۳- تصویر نمونه‌های (a) آب جوش، (b) هیدروکسید سدیم، (c) اسید بوریک و (d) شاهد غوطه‌ور در آب مقطر

Figure 3. Image of Boiling Water (a), Sodium hydroxide (b), Boric acid (c) and Control (d) samples immersed in distilled water

زمانی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت و بعد یک هفته، دو هفته، سه هفته و چهار هفته از ظرف خارج شدند و رطوبت سطحی آنها با کاغذ صافی گرفته شد و دوباره از سطح مقطع آنها در زیر میکروسکوپ استریو با همان بزرگنمایی عکس گرفته شد. واکنشیدگی سطح مقطع با دقت بالا با استفاده از نرم‌افزار Image-z اندازه‌گیری گردید. ارزیابی‌ها در چهار گروه و در هر گروه با ده تکرار انجام شد.

اندازه‌گیری واکنشیدگی نمونه‌ها از تمام نمونه‌های تیمار شده و تیمار نشده، لایه‌هایی با ضخامت حدود ۲ تا ۳ میلی‌متر تهیه شد. لایه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون با دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس از سطح مقطع تمامی نمونه‌ها در حالت خشک در زیر میکروسکوپ استریو با بزرگنمایی ۶۰ برابر عکس گرفته شد (شکل ۴-ا). پس از آن، تمامی لایه‌ها در ظروف آب مقطر غوطه‌ور شده (شکل ۴-ب) و در فواصل



شکل ۴- تصویر (a) سطح مقطع نمونه شاهد در زیر میکروسکوپ استریو و (b) نمونه‌های شاهد، هیدروکسید سدیم، اسید بوریک و آب جوش غوطه‌ور در آب مقطر

Figure 4. Image (a) Cross-section of control sample under stereo microscope and (b) samples of control, sodium hydroxide, boric acid and boiling water immersed in distilled water

مدل VEGA استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها از طلا برای پوشش نمونه استفاده گردید و نمونه‌ها با بزرگنمایی  $20 \mu\text{m}$  مورد بررسی و مقایسه با نمونه شاهد قرار گرفت.

### تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف با استفاده از آزمون تجزیه واریانس (ANOVA) و با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 تجزیه و تحلیل شدند. آزمون تجزیه واریانس بر اساس طرح کاملاً تصادفی (CRD) با ۱۰ تکرار انجام گردید، سپس مقایسه بین میانگین تیمارها انجام شد. نتایج در هر بخش به صورت جداول ارائه شد.

### نتایج

جرم، حجم و جرم حجمی نمونه‌های تیمار نشده (شاهد) پس از خشک شدن در آون

### روش طیف‌سنجی (FTIR)

برای گرفتن طیف از دستگاه FTIR مدل Alpha استفاده شد. در ابتدا نمونه‌های تیمار شده و تیمار نشده با دستگاه آسیاب خرد و پودر شدند. از پودر حاصل در ترکیب با KBr داخل دستگاه پرس یک قرص با قطر ۵ mm تهیه و در اختیار اپراتور دستگاه FTIR قرار داده شد. ترکیبات هر ۴ گروه از نمونه‌ها با رزولوشن  $4 \text{ cm}^{-1}$  و با SCAN/MIN ۱۶ و طول‌موج بین ۵۰۰ تا ۳۵۰۰ مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت.

### روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی ریز ساختار سطح مقطع نمونه‌های بامبو، از سطح مقطع نمونه‌های تیمار شده و تیمار نشده عکس SEM تهیه شد. برای تهیه تصاویر SEM، از میکروسکوپ

به طور متوسط ۸/۳۸٪ کاهش جرم، ۳/۹۱٪ کاهش حجم و ۴/۹۴٪ کاهش جرم حجمی (جدول ۱) داشته‌اند.

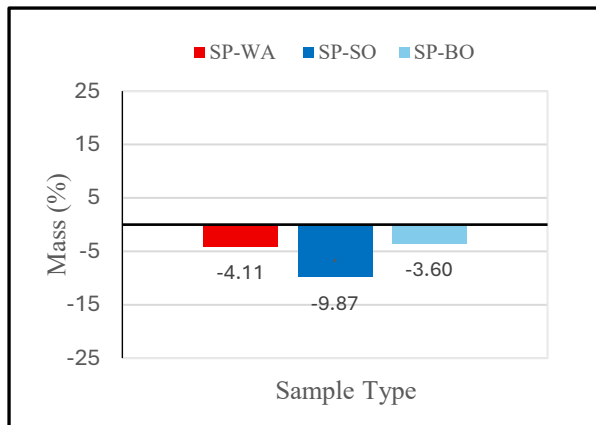
جدول ۱- تغییرات جرم، حجم و جرم حجمی نمونه‌های تیمار نشده قبل و بعد از خشک شدن در آون

Table 1- Changes in mass, volume, and density of untreated samples before and after oven drying

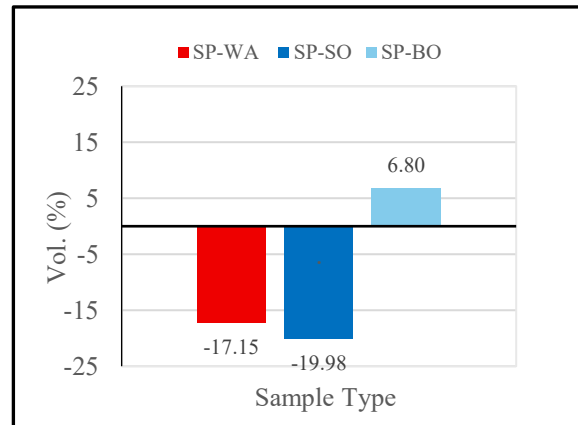
Number of samples	Before putting in the oven		After being in the oven		Rate of change in mass, volume and density		
	Ave. density (gr/cm <sup>3</sup> )	Ave. density (gr/cm <sup>3</sup> )	Mass red. (%)	Volume red. (%)	Density red. (%)		
40	0.85±0.02	0.81±0.02	8.38±0.80	3.91±0.98	4.94±0.02		

براین، نمونه‌های تیمار شده با آب جوش و هیدروکسید سدیم، به ترتیب کاهش حجمی به میزان ۱۷/۱۵٪ و ۱۹/۹۸٪ را نشان داده است، در مقابل، نمونه‌های تیمار شده با اسید بوریک افزایش حجم ۶/۸۰٪ را نشان دادند (شکل ۵-ب).

نمونه‌های تیمار شده با آب جوش، هیدروکسید سدیم و اسید بوریک که در حالت خشک ارزیابی و با شرایط خشک قبل از تیمار مقایسه شدند - به ترتیب کاهش جرم ۴/۱۱٪، ۳/۶۰٪ و ۹/۸۷٪ را نشان می‌دهد (شکل ۵-ا). علاوه



(a)



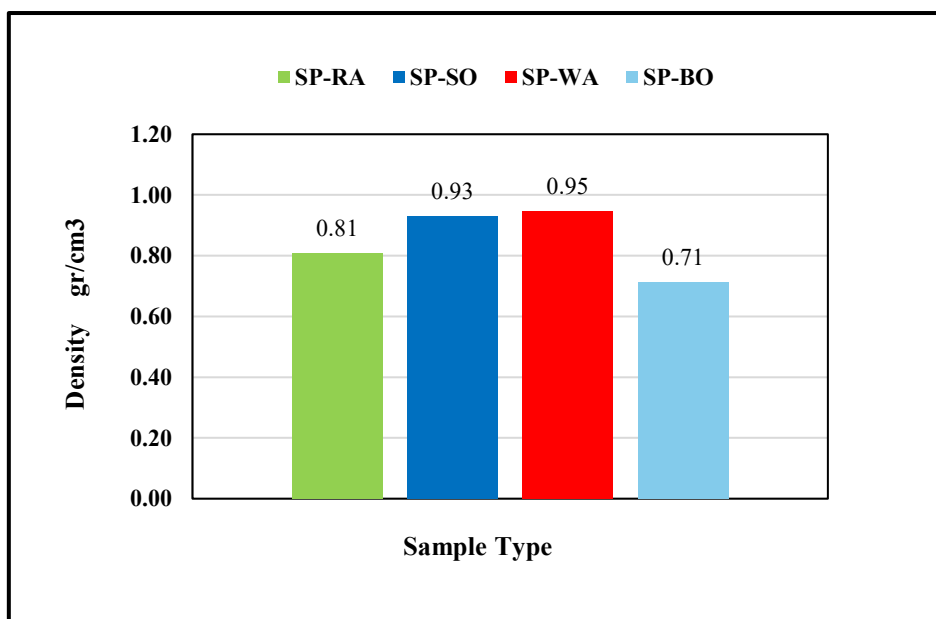
(b)

شکل ۵- تغییرات میزان جرم و حجم پس از تیمار در حالت خشک (a) تغییر جرم، (b) تغییر حجم.

Figure 5. Changes in mass and volume after treatment in the dry state (a) mass change, (b) volume change

بوریکی کاهش چگالی داشتند (شکل ۶). تجزیه واریانس داده‌های حاصل از تغییرات جرم، حجم و چگالی نمونه‌های تیمار شده پس از تیمار نسبت به قبل از تیمار در جدول ۲ آمده است. این جدول نشان می‌دهد که میانگین تغییرات جرم، حجم و چگالی در سطح احتمال ۱٪ اختلاف معنی‌داری داشته است.

چگالی نمونه‌های تیمار نشده به طور متوسط ۰/۰۸۵±۰/۰۲ گرم بر سانتیمتر مکعب محاسبه شد که پس از خشک شدن به ۰/۰۸۱±۰/۰۲ گرم بر سانتیمتر مکعب کاهش یافت. در حالت خشک، نمونه‌های تیمار شده با آب جوش و هیدروکسید سدیم در مقایسه با نمونه تیمار نشده افزایش چگالی نشان دادند. بعکس، نمونه‌های تیمار شده با اسید



شکل ۶- جرم حجمی نمونه‌های تیمار شده و شاهد

Figure 6. Density of treated and control samples

جدول ۲- تجزیه واریانس داده‌های حاصل از تغییرات جرم، حجم و چگالی قبل و بعد از تیمار در حالت خشک

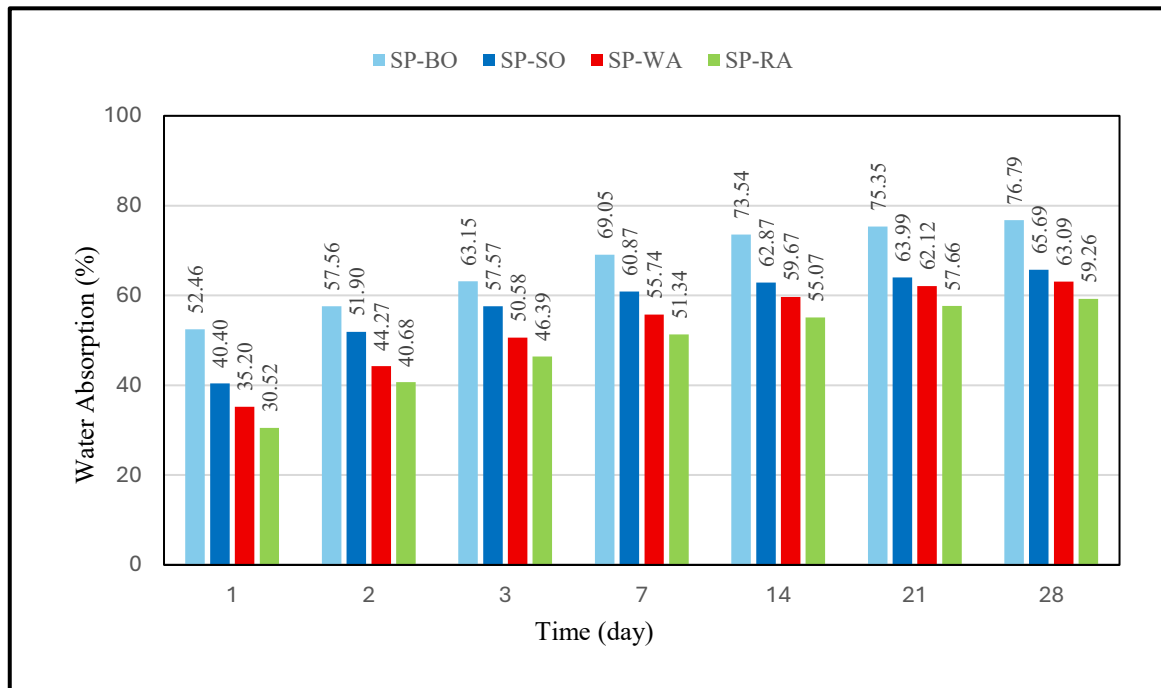
Table 2- Analysis of variance of data obtained from changes in mass, volume and density before and after treatment in the dry state

Source	DF	Mean Square	F Value	Pr > F
Mass (%)	2	2165.450293	673.00	<.0001
Volume (%)	2	121.1183633	138.58	<.0001
Density (%)	3	0.05782667	102.35	<.0001

## جذب آب

میزان جذب آب پس از ۲۸ روز غوطه‌وری در آب مقطر، برای نمونه‌های بامبو تیمار شده با اسید بوریک، هیدروکسید سدیم و آب‌جوش به ترتیب ۷۶/۸٪، ۶۵/۷٪، ۶۳/۱٪ و نمونه شاهد ۵۹/۳٪ به‌دست آمده است (شکل ۷).

تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های به‌دست آمده از جذب آب نمونه‌های خام و تیمار شده در ۲۸ روز در جدول ۳ آمده است. این جدول نشان می‌دهد که میانگین تغییرات جذب آب نمونه‌های خام و تیمار شده در ۲۸ روز اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ دارند.



شکل ۷- جذب آب نمونه‌های تیمار شده و شاهد در مدت ۲۸ روز

Figure 7. Water absorption of treated and control samples within 28 days

جدول ۳- آنالیز واریانس داده‌های حاصل از جذب آب نمونه‌های خام و تیمار شده در ۲۸ روز

Table 3- Analysis of variance of data obtained from water absorption of raw and treated samples in 28 days

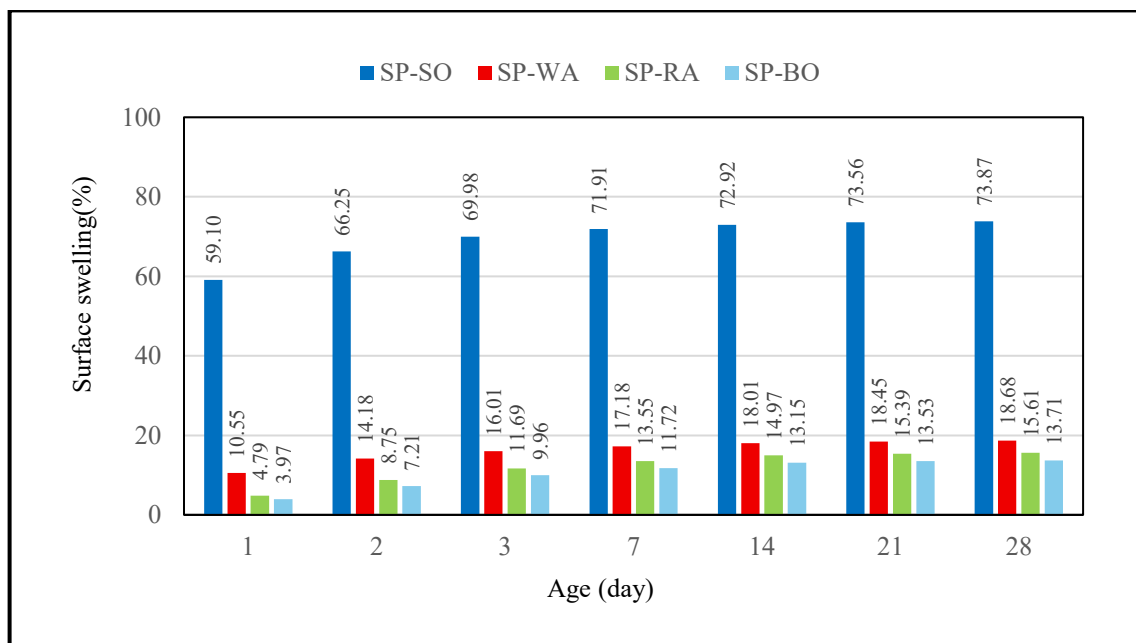
Source	DF	Mean Square	F Value	Pr > F
1 Day	3	892.766760	39.80	<.0001
2 Day	3	577.137797	27.80	<.0001
3 Day	3	551.662570	24.02	<.0001
7 Day	3	525.788757	31.69	<.0001
14 Day	3	616.583050	23.60	<.0001
21 Day	3	567.380730	22.28	<.0001
28 Day	3	570.093770	21.74	<.0001

۱۸٪/۷ و نمونه شاهد ۱۵/۶٪ به دست آمده است (شکل ۸). تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های به دست آمده از واکنش‌دهی سطح مقطع نمونه‌های تیمار شده و خام، غوطه‌ور در آب به مدت ۲۸ روز در جدول ۴ نشان داده شده است. براساس این

واکنش‌دهی سطحی واکنش‌دهی سطحی پس از ۲۸ روز غوطه‌وری در آب مقطر، برای نمونه‌های بامبو تیمار شده با اسیدبوریک، هیدروکسید سدیم و آب‌جوش به ترتیب ۱۳/۷٪، ۷۳/۹٪،

اندازه‌گیری، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ داشته است.

جدول، میانگین تغییرات واکسیدگی سطح مقطع نمونه‌های خام و تیمار شده غوطه‌ور در آب در تمام زمان‌های



شکل ۸- درصد واکسیدگی سطحی نمونه‌های تیمار شده و شاهد در مدت ۲۸ روز غوطه‌وری در آب

Figure 8. Surface Swelling percentage of treated and control samples during 28 days Immersion into water

جدول ۴- آنالیز واریانس داده‌های حاصل از واکسیدگی سطح مقطع نمونه‌های خام و تیمار شده در ۲۸ روز

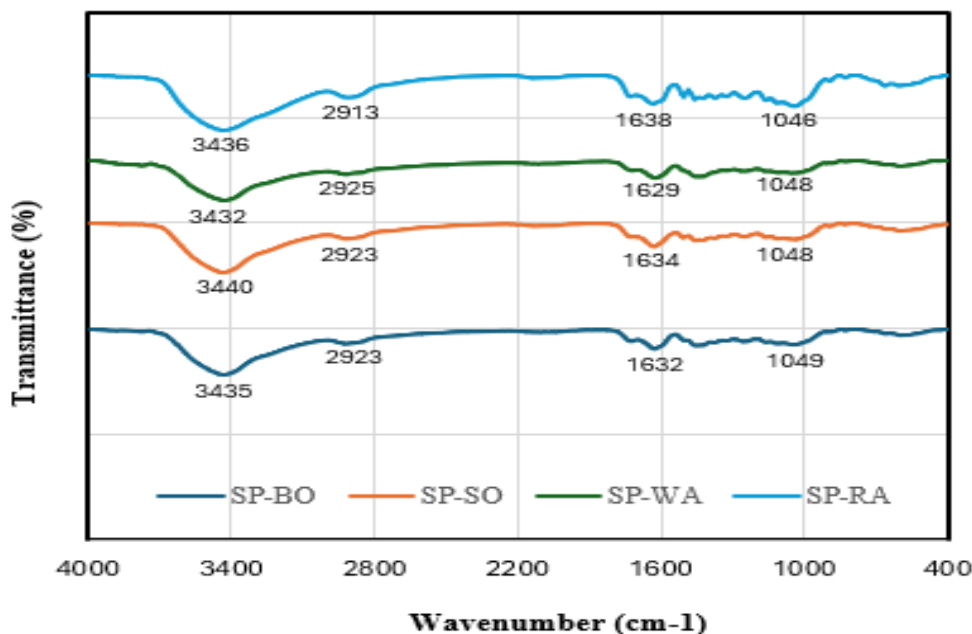
Table 4- Analysis of variance of data obtained from cross-sectional swelling of raw and treated samples at 28 days

Source	DF	Mean Square	F Value	Pr > F
1 Day	3	7020.90889	1889.32	<.0001
2 Day	3	7985.01060	1872.59	<.0001
3 Day	3	8308.07993	1363.18	<.0001
7 Day	3	8391.12382	1230.93	<.0001
14 Day	3	8318.59436	1165.72	<.0001
21 Day	3	8384.10617	1168.54	<.0001
28 Day	3	8414.15475	1514.09	<.0001

طیف‌سنجی (FTIR)

۱۶۰۰ را نشان می‌دهد؛ در مقابل، شدت پیک O-H در محدوده  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  افزایش یافته است. در نمونه تیمار شده با اسید بوریک پیک‌های جدیدی در حدود  $1300-1400\text{ cm}^{-1}$  (پیوندهای B-O) همراه با کاهش شدت پیک O-H در  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده است. نمونه تیمار شده با آب جوش نیز کاهش جزئی شدت پیک‌های  $1730\text{ cm}^{-1}$  همراه با شدت متوسط پیک O-H را نشان می‌دهد.

طیف‌های FTIR برای نمونه‌های تیمار شده با اسیدبوریک، هیدروکسید سدیم، آب جوش و شاهد در شکل ۹ نشان داده شده است. این طیف‌ها در محدوده  $500$  تا  $3500\text{ cm}^{-1}$  ثبت شده‌اند. در نمونه شاهد، پیک‌های قوی در حدود  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  (کشش O-H)،  $1730\text{ cm}^{-1}$  (C=O) همی سلولز،  $1500-1600\text{ cm}^{-1}$  (حلقه‌های آروماتیک لیگنین) و  $1050\text{ cm}^{-1}$  (C-O-C در سلولز) قابل مشاهده است. در نمونه تیمار شده با هیدروکسید سدیم، طیف کاهش



قابل توجه شدت پیک  $1730\text{ cm}^{-1}$  و بازه  $1500-1700\text{ cm}^{-1}$

شکل ۹- طیف FTIR نمونه‌های تیمار شده آب جوش، اسیدبوریک، هیدروکسید سدیم و شاهد

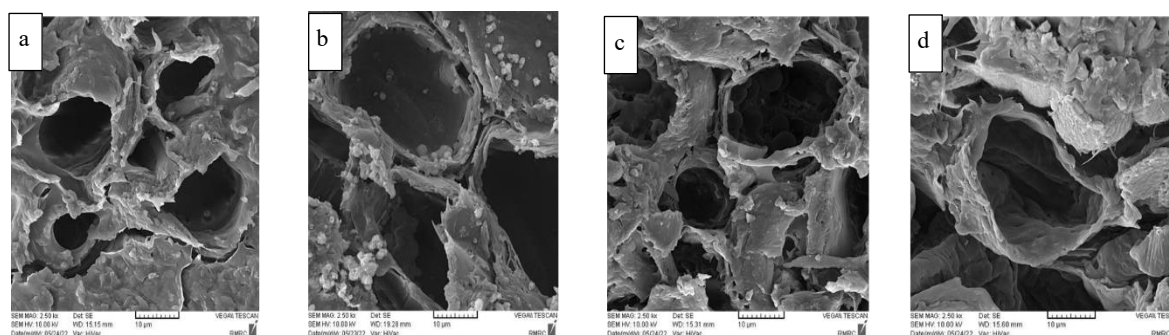
Figure 9. FTIR spectra of samples treated with boiling water, boric acid, sodium hydroxide and control

کشیدگی جزئی فیبرها و سطوح ناهموار ناشی از استخراج مواد محلول قابل مشاهده است. نمونه تیمار با اسیدبوریک (شکل ۱۰- c) با سلول‌های حفظ شده، رسوبات احتمالی بورات در لومن (حفره) سلول‌ها، کاهش تخلخل و آرایش سفت تر فیبرها، مورفولوژی تثبیت شده‌ای را نشان داد. نمونه تیمار با هیدروکسید سدیم (شکل ۱۰- d) با تخلخل بالا، جدایی فیبرها، دیواره‌های نازک سلول، سطوح ناهموار و حذف اجزای غیرسلولی مانند نشاسته، بیشترین تغییرات را

### میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر SEM برای نمونه‌های تیمار شده با اسیدبوریک، هیدروکسید سدیم، آب جوش و شاهد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در نمونه شاهد (شکل ۱۰- a) ساختار فشرده‌ای از سلول‌های پارانشیم بیضی شکل، دیواره‌های ضخیم سلول، تخلخل کم، سطوح صاف و آرایش یکنواخت فیبرها بدون ترک مشاهده شد. نمونه تیمار با آب جوش (شکل ۱۰- b) تغییرات کمتری داشت، در این نمونه افزایش جزئی تخلخل،

داشت.



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه (a) شاهد و نمونه‌های تیمار شده (b) آب جوش، (c) اسیدبوریک و (d)

هیدروکسیدسدیم

Figure 10 - Electron microscope image of (a) control sample and samples treated with (b) boiling water, (c) boric acid and (d) sodium hydroxide

## بحث

جرم، حجم و جرم حجمی

افزایش چگالی در نمونه‌های تیمار شده با آب جوش و هیدروکسید سدیم دارد. دلیل این موضوع، این است که کاهش حجم به‌طور متناسب بیشتر از کاهش جرم بود. برعکس در نمونه‌های اسید بوریک به دلیل اینکه کاهش جرم همراه با افزایش حجم بوده کاهش چگالی رخ داده است. این یافته‌ها با مطالعات Qi و همکاران (۲۰۲۳) همسو است، اگرچه برخی منابع افزایش چگالی حجمی را پس از تیمار با اسید بوریک گزارش کرده‌اند که ممکن است به دلیل تغییرات در گونه‌های بامبو یا روش‌های استفاده شده در تیمار باشد.

جذب آب

نتایج نشان از افزایش جذب آب در نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه شاهد دارد. دلیل این موضوع را می‌توان به تغییرات ساختاری ناشی از تیمارها نسبت داد. مطالعات اخیر نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. Yang و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده‌اند که تخلخل سطحی در بافت‌های پارانشیمی بامبو نقش کلیدی در نفوذپذیری دارد. همچنین، Han و همکاران (۲۰۲۵) تأکید کرده‌اند که ساختار متخلخل و گروه‌های هیدروکسیل در دیواره سلولی موجب افزایش آب‌دوستی و جذب رطوبت می‌شود. تیمار با اسید بوریک بیشترین افزایش

نتایج نشان داد نمونه‌های تیمار نشده (شاهد) پس از خشک شدن در آون به دلیل از دست دادن رطوبت دچار کاهش جرم، حجم و جرم حجمی شده‌اند (Zhu, J. & Yang, L., 2025). در نمونه‌های تیمار شده با آب جوش، هیدروکسید سدیم و اسید بوریک نیز کاهش جرم مشاهده شد که به تجزیه و انحلال اجزای غیر ساختاری و مواد استخراجی در دیواره‌های سلولی بامبو نسبت داده می‌شود که در آب گرم و محلول‌های قلیایی محلول هستند (Wu et al., 2023; Shu-nong et al., 2023). در نمونه‌های تیمار شده با آب جوش و هیدروکسید سدیم، کاهش حجم مشاهده شده ناشی از انقباض سلولی و از دست دادن آب و سایر مواد از ساختار بامبو است (Shu-nong et al., 2023). در مقابل افزایش حجم نمونه‌های تیمار شده با اسید بوریک با تورم سلول‌های بامبو و نفوذ مولکول‌های اسید بوریک به ساختار سلولی آنها سازگار است که باعث افزایش فضای داخلی و افزایش حجم نمونه می‌شود (Yusof et al., 2023; Liu, 2023). همچنین نتایج نشان از

افزایش تورم می‌گردد. این موضوع با داده‌های تجربی در مورد افزایش میزان جذب آب در کامپوزیت‌های تیمار شده نسبت به نمونه‌های بدون تیمار نیز تأیید شده است (Zhang et al., 2021). در مقابل، تیمار اسیدبوریک کمترین میزان تورم را نشان داد. این موضوع به رسوب اسید بوریک در حفره‌های سلولی و بافت پارانشیم نسبت داده می‌شود که موجب ضخیم شدن دیواره‌های سلولی، کاهش دسترسی به فضاهای خالی (voids) و تشکیل پیوندهای عرضی (cross-links) می‌گردد؛ در نتیجه، تحرک مولکولی محدود شده و پایداری ابعادی افزایش می‌یابد (Yusof et al., 2023). در تیمار آب جوش، واکنشیدگی متوسط در نمونه‌ها ناشی از حذف ترکیبات هیدروفیلیک است؛ فرایندی که رطوبت‌پذیری را کاهش داده و بدون ایجاد تغییرات شیمیایی عمده، موجب بهبود پایداری می‌شود (Baharuddin et al., 2022). نمونه بدون تیمار (شاهد) نیز به دلیل ساختار طبیعی فشرده و حفظ لیگنین، تورم کمتری نسبت به آب جوش نشان داد؛ عاملی که مقاومت ذاتی در برابر واکنشیدگی را فراهم می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات اخیر توسط سایر محققان هم‌راستا هستند؛ مطالعاتی که بر اهمیت انتخاب نوع تیمار در بهینه‌سازی عملکرد کامپوزیت‌ها تأکید دارند (Zhao et al., 2024). تیمار قلبایی با هیدروکسیدسدیم موجب بهبود قابل توجه خواص مکانیکی می‌شود، هرچند این بهبود با کاهش پایداری بلندمدت همراه است (Massaguni et al., 2025). در مقابل، تیمارهای حرارتی و اسید بوریک عمدتاً با هدف افزایش دوام و مقاومت در برابر تخریب محیطی استفاده می‌شوند (Liu, 2023; Yusof et al., 2023).

#### طیف‌سنجی (FTIR)

تحلیل طیف‌های FTIR برای نمونه‌های تیمار شده با اسیدبوریک، هیدروکسیدسدیم، آب‌جوش و شاهد نشان‌دهنده تغییرات شیمیایی در ترکیبات دیواره سلولی بامبو است که مستقیماً با الگوهای جذب آب و واکنشیدگی سطحی مشاهده شده هم‌خوانی دارد. نتایج نشان‌دهنده افزایش جذب آب در نمونه‌های تیمار شده، به‌ویژه اسید بوریک و واکنشیدگی

را نشان داد که احتمالاً به دلیل خاصیت جاذب رطوبت بودن بور است که آب را به‌طور فعال جذب می‌کند و میزان واکنشیدگی را بالا می‌برد (Liu, 2023). تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که ترکیبات بور در فیبرهای طبیعی جذب آب را افزایش می‌دهد (Avci et al., 2023) که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد و بر نقش گروه‌های هیدروکسیل در تعامل با آب تأکید دارد. تیمار با هیدروکسید سدیم باعث حذف لیگنین و همی‌سلولز شده و تخلخل نمونه را افزایش می‌دهد، اما این افزایش کمتر از اثر تیمار با اسید بوریک است، زیرا هیدروکسید سدیم فاقد خاصیت جذب ذاتی است. همچنین، تیمار با آب جوش موجب خارج شدن مواد قابل‌استخراج از نمونه می‌شود و افزایش جزئی در تخلخل ایجاد می‌کند، درحالی‌که نمونه تیمار نشده به دلیل ساختار طبیعی متراکم‌تر، کمترین میزان جذب را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با مطالعات اخیر هم‌راستا هستند که نشان‌دهنده افزایش جذب آب در کامپوزیت‌های تیمار شده با بوریک اسید به دلیل طبیعت آب‌دوستی است (Guo et al., 2023). با این حال، برای کاربردهای عملی از بامبو، همانند ساخت‌وساز و استفاده از آن به‌عنوان یک عامل مسلح‌کننده در اعضا بتنی، این افزایش ممکن است دوام را کاهش دهد.

#### واکنشیدگی سطحی

نتایج به‌دست‌آمده از واکنشیدگی سطحی بیانگر تأثیرات متفاوت انواع تیمار بر رفتار رطوبت‌پذیری و یکپارچگی ساختاری بامبو است. واکنشیدگی بالای نمونه‌های تیمار شده با هیدروکسیدسدیم به فرایند لیگنین‌زدایی ناشی از تیمار قلبایی و حل شدن همی‌سلولز نسبت داده می‌شود (Wang et al., 2024). این تغییرات موجب افزایش تخلخل و آشکار شدن بیشتر گروه‌های هیدروکسیل می‌گردد که در نهایت نفوذ آب و تورم الیاف را در دوره‌های طولانی تسهیل می‌کند (Geremew et al., 2024). این یافته با سازوکارهایی هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند تیمار هیدروکسیدسدیم در ابتدا موجب بهبود چسبندگی می‌شود، اما در مواجهه‌های طولانی مدت، باعث ایجاد شکاف‌های ریز (micro-gaps) و

که نشان‌دهنده تشکیل پیوندهای عرضی (cross-links) بین بور و گروه‌های هیدروکسیل است. این تغییرات شیمیایی جذب آب بالا (۷۶/۸٪) را توضیح می‌دهد که به دلیل خاصیت جاذب رطوبت بور است؛ اما انبساط پایین (۱۳/۷٪) را با محدود کردن تحرک مولکولی و افزایش ضخامت دیواره سلولی توجیه می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که تیمار بوریک اسید با تقویت واکنش‌های دهیدراسیون، آب‌دوستی را افزایش می‌دهد اما پایداری ابعادی را بهبود می‌بخشد که با هم‌بستگی منفی بین شدت پیک OH و میزان واکنش‌دهی هم‌خوانی دارد. این مکانیسم در کامپوزیت‌های بامبوی تیمار شده با بور، کاهش تورم را با وجود جذب بالا توجیه می‌کند (Li et al., 2025; Duan et al., 2023). در نمونه تیمار شده با آب جوش، طیف FTIR کاهش جزئی شدت پیک‌های  $1730\text{ cm}^{-1}$  (ناشی از حذف نسبی همی‌سلولز و مواد قابل استخراج) و حفظ نسبی پیک‌های لیگنین را، همراه با شدت متوسط پیک O-H، نشان می‌دهد. در این تیمار، مواد هیدروفیلیک خارج شده و جذب آب (۶۳/۱٪) و واکنش‌دهی (۷/۱۸٪) اندکی بالاتر از نمونه شاهد، بدون ایجاد تغییرات شیمیایی عمده، مشاهده می‌شود. تحقیقات اخیر تأکید می‌کنند که استخراج با آب داغ، با کاهش پیک‌های هیدروفیلیک، جذب رطوبت را تعدیل می‌کند و هم‌بستگی مثبتی با بهبود جزئی پایداری ابعادی دارد، هرچند کمتر از تیمارهای شیمیایی است (Zhao et al., 2024; Tan et al., 2025).

#### میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر SEM برای نمونه‌های تیمار شده با اسیدبوریک، هیدروکسیدسدیم، آب‌جوش و شاهد نشان‌دهنده تفاوت‌های بارز در مورفولوژی سطحی، میزان تخلخل و یکپارچگی ساختاری الیاف بامبو پس از اعمال تیمارهای مختلف هستند. این تفاوت‌ها مستقیماً بر رفتار مکانیکی، رطوبت‌پذیری و دوام کامپوزیت‌های حاصل از این الیاف

بیشتر در هیدروکسیدسدیم است، درحالی‌که پایداری ابعادی بهتر در اسید بوریک را توجیه می‌کند. تحلیل بر اساس الگوهای معمول گزارش شده در مطالعات اخیر استوار است، جایی که کاهش یا افزایش شدت پیک‌های خاص با خواص رطوبتی مرتبط می‌شود.

طیف ثبت شده برای نمونه شاهد، نشان‌دهنده ساختار طبیعی و متراکم با تعادل بین اجزای هیدروفیل و هیدروفوب است. این ساختار منجر به کمترین جذب آب (۵۹/۳٪) و واکنش‌دهی متوسط (۱۵/۶٪) می‌شود، زیرا گروه‌های OH محدودتر و توسط لیگنین محافظت شده هستند. مطالعات نشان می‌دهند که شدت بالاتر پیک O-H در نمونه شاهد با جذب رطوبت متوسط هم‌بستگی دارد، اما بدون تغییرات عمده در تخلخل، واکنش‌دهی محدود باقی می‌ماند (Adil et al., 2024).

در نمونه تیمار شده با هیدروکسید سدیم، کاهش قابل توجه شدت پیک  $1730\text{ cm}^{-1}$ ، مرتبط با حذف همی‌سلولز و بازه  $1600-1500\text{ cm}^{-1}$ ، بیانگر کاهش لیگنین، است. این تغییرات ناشی از فرایند لیگنین‌زدایی قلیایی است که با افزایش تخلخل ساختار و در معرض قرار گرفتن بیشتر گروه‌های هیدروکسیل سلولز همراه بوده و موجب افزایش جذب آب (۶۵/۷٪) و انبساط قابل توجه (۷۳/۹٪) می‌شود (Madyira, D.M. & Olatunji, K.O., 2025). تحقیقات اخیر تأیید می‌کنند که تیمار هیدروکسید سدیم با کاهش پیک‌های لیگنین، آب‌دوستی را افزایش می‌دهد و هم‌بستگی مستقیمی با میزان انبساط ابعادی دارد، زیرا شکاف‌های ریز تشکیل شده اجازه نفوذ بیشتر آب را می‌دهند. این الگو با افزایش جذب آب و کاهش پایداری ابعادی در کامپوزیت‌های بامبوی تیمار شده قلیایی هم‌خوانی دارد، جایی که شدت پیک OH مستقیماً با تورم مرتبط است (Liu et al., 2024; Chen et al., 2025).

در نمونه تیمار شده با اسید بوریک پیک‌های جدیدی در حدود  $1300-1400\text{ cm}^{-1}$  (پیوندهای B-O) همراه با کاهش شدت پیک O-H در  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده است

محلول قلیایی رخ داد؛ که موجب منظم تر شدن ساختار سلولز و درعین حال نمایان شدن گروه‌های فعال سطحی و ایجاد فضاهای خالی در بافت الیاف گردید (Chen et al., 2023). تصاویر میکروسکوپی نیز نشان‌دهنده الیاف با سطح باز و تخلخل بالا هستند که ورود آب و تورم را آسان تر می‌کنند. اگرچه این ویژگی‌ها چسبندگی الیاف به ماتریس را در کامپوزیت‌ها بهبود می‌بخشند، اما دوام آن‌ها را در محیط‌های مرطوب کاهش می‌دهند. این نتایج با مطالعات اخیر هم‌راستا هستند، به نحوی که بر ضرورت بهینه‌سازی نوع تیمارهای اعمال شده بر بامبو تأکید دارند. برای نمونه، پیش تیمار با اسید بوریک موجب کاهش تخلخل و بهبود پایداری ابعادی در نوارهای بامبوی مالزیایی شده است (Yusof et al., 2023)، الیاف در کامپوزیت‌ها را تسهیل می‌کند، اما درعین حال، میزان جذب رطوبت (هیگروسکوپیسیته) را نیز افزایش می‌دهد (Geremew et al., 2024). به طور کلی، هر تیمار اثر متفاوتی بر ویژگی‌های رطوبت‌پذیری و ساختار داخلی بامبو دارد؛ تیمار اسید بوریک با وجود جذب بالای رطوبت، پایداری ابعادی مناسبی ایجاد می‌کند، درحالی‌که تیمار قلیایی با افزایش تخلخل، کنترل تورم را کاهش می‌دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که می‌توان با انتخاب نوع تیمار مناسب، خواص بامبو را به صورت هدفمند تغییر داد تا برای کاربرد آن در ساخت‌وساز و استفاده به‌عنوان یک عامل مسلح کننده در اعضا بتنی و تولید کامپوزیت‌ها بهینه شود.

### نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که در تیمار بامبو به وسیله محلول‌های آب جوش، هیدروکسید سدیم و اسید بوریک، بیشترین کاهش حجم و جرم را می‌توان در محلول هیدروکسید سدیم و کمترین مقدار را در آب جوش مشاهده کرد. این در حالی است که محلول اسید بوریک جرم را کاهش ولی باعث افزایش حجم شده است. تیمار اسید بوریک در حالی که بیشترین جذب آب را نشان می‌دهد دارای کمترین واکنشیدگی نیز است که این موضوع به تشکیل پیوندهای

تأثیرگذارند. تفاوت‌های مشاهده شده در میزان جذب آب و واکنشیدگی نمونه‌ها به تغییرات شیمیایی و ساختاری ناشی از تیمارها نسبت داده می‌شود. ساختار فشرده نمونه شاهد به ترکیب طبیعی بامبو، شامل حدود ۵۰-۶۰ درصد سلولز، ۲۰-۳۰ درصد همی‌سلولز و ۲۰-۲۵ درصد لیگنین، مربوط است که مانع نفوذ آب می‌شود و جذب پایین‌تر (۵۹/۳٪) و واکنشیدگی متوسط (۱۵/۶٪) ایجاد می‌کند (Martijanti et al., 2021). این ترکیب طبیعی یکپارچگی مکانیکی ذاتی فراهم می‌کند، اما حساسیت به تخریب در حالت مرطوب را افزایش می‌دهد. تیمار با آب جوش جذب آب را به‌طور متوسط افزایش داد، زیرا استخراج مواد آب‌دوست مانند قندها و فنولیک‌ها بدون اختلال شیمیایی گسترده تخلخل را کمی بالا می‌برد (Li et al., 2022). واکنشیدگی ۱۸/۷٪ نشان‌دهنده تغییرات ابعادی کنترل شده است، زیرا پردازش حرارتی پیوندهای پلیمری را تا حدی مختل کرده و نفوذ آب را محدود می‌کند. این با اثر تیمار حرارتی هم‌خوانی دارد که پایداری ابعادی بامبو را از طریق تخریب همی‌سلولز بهبود می‌بخشد. تیمار اسید بوریک با جذب رطوبت ۷۶/۸٪، بیشترین میزان جذب را نشان داد؛ این عملکرد به خاصیت رطوبت‌دوستی عنصر بور نسبت داده می‌شود که قادر است مولکول‌های آب موجود در هوا را بدون ایجاد واکنشیدگی قابل توجه، به خود جذب کند (Liu, 2023). تصاویر SEM نشان می‌دهند که ترکیب بورات با زنجیره‌های سلولز، پیوندهای عرضی ایجاد کرده است. این پیوندها ساختار را محکم‌تر و حفره‌ها را مسدود می‌کنند و باعث افزایش پایداری ابعادی می‌شود. این دوگانگی (جذب بالا همراه با واکنشیدگی کم) تیمار با اسید بوریک را برای کاربردهایی مانند محصولات مقاوم به آتش مناسب می‌سازد، جایی که شبکه‌های بورات خواص ضد کپک نیز فراهم می‌کنند. در مقابل، تیمار قلیایی هیدروکسید سدیم باعث افزایش قابل توجهی در میزان تورم (۷۳/۹٪) و جذب آب (۶۵/۷٪) شد. این تغییرات به دلیل حذف مواد چسبنده طبیعی مانند لیگنین و همی‌سلولز از سطح الیاف در اثر استفاده از

آب‌دوستی ذاتی و افزایش چسبندگی سطحی، تیمارهای پیشنه‌دای می‌توانند چالش‌های سنتی الیاف گیاهی را برطرف کنند و به سمت مواد پایدارتر و کارآمدتر هدایت نمایند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند تأثیر بلندمدت بر خواص مکانیکی نیاز به تحقیقات آینده دارد، از جمله می‌توان به ترکیب تیمارها یا ارزیابی در شرایط واقعی صنعتی اشاره کرد. این مطالعه با ارائه شواهد تجربی قوی، گامی مهم در بهینه‌سازی مواد طبیعی برمی‌دارد و می‌تواند مبنایی برای توسعه فناوری‌های سبز باشد.

عرضی و کاهش تحرک مولکولی نسبت داده شده است. تخریب ترکیبات دیواره سلولی در اثر تیمار محلول هیدروکسید سدیم باعث افزایش واکنش‌پذیری سطحی شده است و تیمار با آب جوش نسبت به دو تیمار دیگر شرایط متوسطی را از نظر جذب آب و واکنش‌پذیری سطحی نشان داده است. این نتایج نه تنها اهداف تحقیق را در بهبود پایداری ابعادی بامبو در محیط‌های مرطوب محقق نمودند، بلکه ظرفیت کاربردهای عملی آن را در تولید کامپوزیت‌های زیستی، صنایع ساختمانی و خودروسازی برجسته می‌کنند. با کاهش

## References

- Adil, M.M., Parvez, M.M.H., Rupom, S.M.N., Tasnim, T., Islam, M.S., Gafur, M.A., Mesbah, M.B. and Ahmed, I., 2024. Physical and thermal properties analysis of bamboo and rattan fiber reinforced polymer composite. *Results in Engineering*, 22, p.102084. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102084>
- Avci, A., Eker, A.A., Bodur, M.S. and Candan, Z., 2023. Water absorption characterization of boron compounds-reinforced PLA/flax fiber sustainable composite. *International journal of biological macromolecules*, 233, p.123546. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123546>
- Baharuddin, N., Lee, S., Uyup, M.A. and Tahir, P.M., 2022. Effect of preservative treatment on physical and mechanical properties of bamboo (*Gigantochloa scortechinii*) strips. *BioResources*, 17(3), p.5129. DOI: 10.15376/biores.17.3.5129-5145
- Behera, D., Pattnaik, S.S., Nanda, D., Mishra, P.P., Manna, S. and Behera, A.K., 2025. A review on bamboo fiber reinforced composites and their potential applications. *Emergent Materials*, 8(1), pp.157-172. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00832-9>
- Chen, L.Y., Meng, X.G., Yu, W.W., Zhang, Y.L., Gan, Z.Y. and Yang, C., 2023. Efficient separation of cellulose from bamboo by organic alkali. *Cellulose*, 30(3), pp.1369-1379. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04969-w>
- Chen, X., Wang, X., Gu, S., Huang, A. and Cheng, H., 2025. Effects of alkali treatment on the bending and fracture behavior of biomaterial bamboo. *Polymer Testing*, 143, p.108715. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108715>
- Chen, H., Wu, J., Shi, J., Wang, G. and Zhang, W., 2022. Dimensional Stability and Mold Resistance of Bamboo Slivers Treated by Alkali. *BioResources*, 17(2). 10.15376/biores.17.2.2827-2848. DOI: [10.15376/biores.17.2.2827-2848](https://doi.org/10.15376/biores.17.2.2827-2848)
- Cheng, Z., Mu, C., Li, X., Cheng, W., Cai, M., Wu, C., Jiang, J., Fang, H., Bai, Y., Zheng, H. and Geng, R., 2023. Single-cell transcriptome atlas reveals spatiotemporal developmental trajectories in the basal roots of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). *Horticulture Research*, 10(8), p.uhad122. <https://doi.org/10.1093/hr/uhad122>
- Duan, C., Meng, M., Huang, H., Wang, H., Zhang, Q., Gan, W., Ding, H., Zhang, J., Tang, X. and Pan, C., 2023. Performance and characterization of bamboo-based activated carbon prepared by boric acid activation. *Materials Chemistry and Physics*, 295, p.127130. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127130>
- Elseify, L.A., Midani, M., El-Badawy, A. and Jawaid, M., 2021. Natural fibers in the automotive industry. In: *Manufacturing Automotive Components from Sustainable Natural Fiber Composites*. SpringerBriefs in Materials. Springer, Singapore, pp.1-10. DOI: [10.1007/978-3-030-83025-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83025-0_1)
- Ghavami, K., 2005. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and concrete composites*, 27(6), pp.637-649. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>
- Geremew, A., De Winne, P., Demissie, T.A. and De Backer, H., 2024. Surface modification of bamboo fibers through alkaline treatment: Morphological and physical characterization for composite reinforcement. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19, p.15589250241248764. <https://doi.org/10.1177/15589250241248764>
- Guo, F., Zhang, X., Yang, R., Salmén, L. and Yu, Y., 2021. Hygroscopicity, degradation and thermal

- stability of isolated bamboo fibers and parenchyma cells upon moderate heat treatment. *Cellulose*, 28(13), pp.8867-8876. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04050-y>
- Guo, H., Zhang, C., Zhou, X., Chen, J., Yu, L., Li, H. and Wang, X., 2023. Boron-based mildew preventive and ultraviolet absorbent modification of waterborne polyurethane coatings on laminated bamboo. *Coatings*, 13(4), p.687. <https://doi.org/10.3390/coatings13040687>
- Hill, C., Altgen, M. and Rautkari, L., 2021. Thermal modification of wood—A review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of materials science*, 56(11), pp.6581-6614. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>
- Han, J., Li, J., Zhang, W., Yao, S., Yu, X., Yu, X., Guo, X., He, S., Guo, D. and Lu, Y., 2025. Nature-inspired tooth-mimetic bamboo hierarchical composites with superhard, waterproof, and stain-resistant protective structures. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(5), pp.1-17. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01428-5>
- Hasanagić, R., Mujanić, S., Alibašić, N., Suljadžić, A., Koričić, H., Fathi, L. and Bahmani, M., 2024, June. Analysis of the Hygroscopicity of Thermally Modified Wood: Alterations, Characterizations, and Implications for Enhanced Performance. In *International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies* (pp. 670-682). Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-71694-2\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-031-71694-2_46)
- Javadian A, Wielopolski M, Smith IF, Hebel DE. Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete. *Construction and building materials*. 2016 Sep 30;122:110-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.084>
- Karimah, A., Ridho, M.R., Munawar, S.S., Adi, D.S., Damayanti, R., Subiyanto, B., Fatriasari, W. and Fudholi, A., 2021. A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. *Journal of materials research and technology*, 13, pp.2442-2458. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>
- Lee, G.Z.X., Looi, D.T.W., Choo, C.S. and Tsang, H.H., 2022. A reconnaissance study on tensile strength of bamboo based on global database. *Materials Today: Proceedings*, 64, pp. 1109-1115. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.047>
- Lee, H.P., Kureemun, U., Ravandi, M. and Teo, W.S., 2020. Performance of interlaminar flax-carbon hybrids under bending. *Procedia Manufacturing*, 43, pp.658-665. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.134>
- Liu, T., 2023. Improvements in the physical properties and decay resistance of bamboo materials via modification with boric acid and borax. *Bioresources*, 18(1), p.100. [DOI:10.15376/biores.18.1.100-110](https://doi.org/10.15376/biores.18.1.100-110)
- Liu, Y., Li, H., Feng, Z., Ge, L., Li, R. and Liu, S., 2024. Study on the interfacial bonding properties between alkali-treated bamboo fibers and high-performance seawater sea-sand concrete. *Construction and Building Materials*, 426, p.136190. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136190>
- Li, Z.Z., Luan, Y., Hu, J.B., Fang, C.H., Liu, L.T., Ma, Y.F., Liu, Y. and Fei, B.H., 2022. Bamboo heat treatments and their effects on bamboo properties. *Construction and Building Materials*, 331, p.127320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127320>
- Li, J., Liu, Y., Zhang, J., Sun, X., Li, M., Yu, C., Han, Z., Wei, P. and Liu, T., 2025. Enhanced fire-retardant, smoke-suppressing, and ultra-strong mechanical properties of non-adhesive laminated wood through borate ion crosslinking. *Industrial Crops and Products*, 224, p.120412. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120412>
- Ma, Q.H., 2024. Lignin biosynthesis and its diversified roles in disease resistance. *Genes*, 15(3), p.295. <https://doi.org/10.3390/genes15030295>
- Madyira, D.M. and Olatunji, K.O., 2025. Alkali Pretreatment of Lignocellulose Feedstock Improves Morphological Structure and Biomethane Yield. *Sustainability (2071-1050)*, 17(2).
- Mahanto, B.S. and Pradhan, G., 2021. Bamboo fiber reinforced bio-composites for industrial applications: a review. *Current Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRAMERD 2020*, pp.881-889. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3\\_81](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_81)
- Martijanti, M., Sutarno, S. and Juwono, A.L., 2021. Polymer composite fabrication reinforced with bamboo fiber for particle board product raw material application. *Polymers*, 13(24), p.4377. <https://doi.org/10.3390/polym13244377>
- Massaguni, M., Djafar, Z., Zulkifli, R. and Arma, L.H., 2025. Enhancing mechanical strength of bamboo parring (*Gigantochloa Atter*) fiber with alkaline treatment for flame-retardant composite. *Discover Materials*, 5(1), p.136. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00295-7>
- Mwanja, C.K., Terziev, N., Ishengoma, R., Banana, A. and Kalanzi, F., 2024. Fungal degradation of bamboo treated with crude lake salt and a mixture of borax and boric acid. *Advances in Bamboo Science*, 8,

- p.100092. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100092>
- Qi, Y., Zhou, Z., Xu, R., Dong, Y., Zhang, Z. and Liu, M., 2023. Effect of NaOH pretreatment on permeability and surface properties of three wood species. *ACS omega*, 8(43), pp.40362-40374. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04745>
- Shu-nong, L.I., Ya-mei, Z.H.A.N.G., Yang-lun, Y.U. and Wen-ji, Y.U., 2023. Effect of boiling treatment on physical and mechanical properties of moso bamboo. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 35(3), pp.59-64. DOI:[10.12326/j.2096-9694.2020158](https://doi.org/10.12326/j.2096-9694.2020158)
- Tan, C., Liu, D., Chen, X., Huang, M., Huang, Y., Zhang, X., Yang, R., Guo, F. and Yu, Y., 2025. Fungi-resistant bamboo scrimber with enhanced dimensional stability and mechanical properties through in situ deposition of copper-based particles. *Industrial Crops and Products*, 224, p.120331. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120331>
- Tariq, M., Khushnood, R.A., Babar, Z.B. and Basit, M.A., 2024. Evaluating the potential of chemically modified bamboo for sustainable and green construction. *Journal of Building Engineering*, 86, p.108634. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108634>
- Thimmegowda, D.Y., Hindi, J., Markunti, G.B. and Kakunje, M., 2025. Enhancement of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites Using Different Approaches—A Review. *Journal of Composites Science*, 9(5), p.220. <https://doi.org/10.3390/jcs9050220>
- Wang, Y., Eljamal, R., Nomura, T., Minami, E. and Kawamoto, H., 2025. Thermal reactivities of hemicellulose and cellulose and demineralization effects on their reactivities in cell walls of various softwood and hardwood species. *Journal of Wood Science*, 71(1), p.39. <https://doi.org/10.1186/s10086-025-02216-x>
- Wang, J., Sun, L., Chu, Y.Y., Ou, Y.Q., Liang, B.W., Shan, Z.J., Han, C.B. and Yan, H., 2024. Alkaline–Acidic Sodium Chlorite Pretreatment of Bamboo Powder for Preparation of Excellent Mechanical, Transparent, and Biodegradable Films. *Polymers*, 16(23), p.3361. <https://doi.org/10.3390/polym16233361>
- Wu, J., Yixiu, Z., Zhong, T., Zhang, W. and Chen, H., 2023. Bamboo slivers with high strength and toughness prepared by alkali treatment at a proper temperature. *Journal of Wood Science*, 69(1), p.13. <https://doi.org/10.1186/s10086-023-02084-3>
- Xu H, Giannetti A, Sugiyama Y, Zheng W, Schneider R, Watanabe Y, Oda Y, Persson S. 2022 Secondary cell wall patterning—connecting the dots, pits and helices. *Open Biol.* 12: 210208. <https://doi.org/10.1098/rsob.210208>
- Yadav, M. and Mathur, A., 2021. Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview. *Materials today: proceedings*, 43, pp.2872-2876. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.125>
- Yang, X., Pang, X., Liu, X., Yang, S. and Li, X., 2023. Determining the pore structure and radial variability of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). *Wood Science and Technology*, 57(2), pp.345-357. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01451-5>
- Yusof, N.M., Hua, L.S., Tahir, P.M., James, R.M.S., Al-Edrus, S.S.O., Dahali, R., Roseley, A.S.M., Fatiasari, W., Kristak, L., Lubis, M.A.R. and Reh, R., 2023. Effects of boric acid pretreatment on the properties of four selected Malaysian bamboo strips. *Forests*, 14(2), p.196. <https://doi.org/10.3390/f14020196>
- Zhang, K., Liang, W., Wang, F. and Wang, Z., 2021. Effect of water absorption on the mechanical properties of bamboo/glass-reinforced polybenzoxazine hybrid composite. *Polymers and Polymer Composites*, 29(1), pp.3-14. <https://doi.org/10.1177/0967391120903664>
- Zhao, Z., Qin, C., Piao, X., Yan, Y., Cao, Y., Wang, Z. and Jin, C., 2024. Improving the hydrophobicity, dimensional stability and mold resistance of bamboo by paraffin/microcrystalline wax/stearic acid modification. *Construction and Building Materials*, 414, p.134902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134902>
- Zhao, Y., Xie, X., Wang, X., Mao, S. and Li, Y., 2024. In situ retention of lignin-rich bamboo green effectively improves the surface properties of flattened bamboo. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, p.130411. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130411>
- Zhu, J. and Yang, L., 2025. Progress in the Study of Dry Shrinkage Deformation and Drying Stress of Raw Bamboo. *BioResources*, 20(1). DOI: [10.15376/biores.20.1.Zhu](https://doi.org/10.15376/biores.20.1.Zhu)
- Zwawi, M., 2021. A review on natural fiber bio-composites, surface modifications and applications. *molecules*, 26(2), p.404. <https://doi.org/10.3390/molecules26020404>