



Surface modification and improvement of adhesive bondline shear strength in strands derived from date palm leaflets using selective chemical treatments

Nourmohammad Rahmatollahi¹ | Hamidreza Edalat^{2*} | Mehrab Madhoushi³ | Sahab Hedjazi⁴ | Ghanbar Ebrahimi⁵

1. Department of Wood Engineering and Technology, Faculty of Wood & Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: nour.rahmatollahi@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Wood Engineering and Technology, Faculty of Wood & Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: h.edalat@gau.ac.ir
3. Department of Wood Engineering and Technology, Faculty of Wood & Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: mehrab.madhoushi@gmail.com
4. Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood & Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: shedjazi@gau.ac.ir
5. Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ba_ebrahimi@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 01 January 2026

Revised: 23 January 2026

Accepted: 23 January 2026

Published online: 10 June 2026

Keywords:

*Biobased composites,
Chemical modification,
Cuticle,
Dewaxing,
Resin bonding,
Surface chemistry.*

ABSTRACT

Introduction: The shortage of wood resources and growing environmental concerns have led to increasing attention toward agricultural residues as alternative raw materials for engineered wood products. Date palm leaflets offer potential for use in products such as oriented strand board (OSB) and laminated strand lumber (OSL). However, the cuticular layer, rich in waxes and extractives, hinders effective bonding with industrial resins. The objective of this study was to modify the surface structure of date palm leaflets through chemical treatments to enhance adhesion and improve the mechanical performance of bio-based composites.

Method: In this work, palm leaflets were subjected to individual and combined chemical treatments including sodium hydroxide (NaOH), sulfuric acid (H_2SO_4), and n-hexane. Surface and structural properties were characterized using water drop contact angle measurements, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), field emission scanning electron microscopy (FESEM), and a stereomicroscope. To assess the effectiveness of treatments on adhesive bonding, lap shear strength tests were conducted using two types of resins, phenol formaldehyde (PF) and polymeric diphenylmethane diisocyanate (PMDI), according to ASTM D7998.

Results: The results indicated significant modifications in the surface properties of treated samples. Contact angle measurements revealed reduced values after treatment, confirming improved wettability. FTIR spectra showed the weakening or removal of carbonyl and carboxyl functional groups due to different chemical treatments, demonstrating successful fat and wax elimination. FESEM and stereoscopic observations demonstrated changes in texture and porosity, as well as the removal of surface coatings. The shear strength test of the glue line also indicated that the combined n-hexane-hydroxide (HN) treatment produced the greatest improvement in bonding performance. When isocyanate resin was used, the shear strength in the HN treatment increased to 1.9 MPa, indicating a strong interaction between the treated surface and the resin, while the control sample recorded only about 0.28 MPa.

Conclusion: The findings of the present study showed that date palm leaflets contain a significant amount of waxes that disrupt adhesion. Modifying the surface of date palm leaflets using chemical treatments can significantly improve resin adhesion to the leaf surface and enhance mechanical strength. In addition to adhesion strength, the physical condition of the leaflets and environmental considerations are important for achieving sustainable production. Overall, this research paves the way for sustainable utilization of agricultural residues in the development of biobased composites.

Cite this article: Rahmatollahi, N., Edalat, H., Madhoushi, M., Hedjazi, S., Ebrahimi, G. (2026). Surface modification and improvement of adhesive bondline shear strength in strands derived from date palm leaflets using selective chemical treatments. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (1), 1-18. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.407901.1384>





اصلاح سطحی و بهبود مقاومت برشی خط چسب در تراشه‌های حاصل از برگچه نخل خرما با استفاده از تیمارهای شیمیایی انتخابی

نورمحمد رحمت‌اللهی^۱ | حمیدرضا عدالت^{۲*} | محراب مدهوشی^۳ | سحاب حجازی^۴ | قنبر ابراهیمی^۵

۱. گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: nour.rahmatollahi@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: h.edalat@gu.ac.ir
۳. گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mehrab.madhoushi@gmail.com
۴. گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: shedjazi@gu.ac.ir
۵. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ba_obrahimi@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

مقدمه: استفاده از بقایای کشاورزی به‌عنوان منبعی جایگزین برای تولید فرآورده‌های مهندسی چوب، به‌دلیل کمبود منابع چوبی و دغدغه‌های زیست‌محیطی، اهمیت روزافزونی پیدا کرده است. برگچه نخل خرما نیز ظرفیت بالقوه‌ای برای استفاده در تولید فرآورده‌های مهندسی شده چوبی مانند تخته تراشه جهت‌دار (OSB) و الوار تراشه‌ای جهت‌دار (OSL) دارد. با این حال، به‌نظر می‌رسد وجود لایه کوتیکول در سطح برگچه نخل خرما که غنی از مواد استخراجی چرب و موم‌ها است، مانع اصلی برقراری پیوند مؤثر میان سطح برگچه و رزین‌های صنعتی است. هدف این پژوهش، اصلاح ساختار سطحی برگچه نخل خرما از طریق تیمارهای شیمیایی به‌منظور بهبود چسبندگی و ارتقای ویژگی‌های مکانیکی در تولید کامپوزیت‌های زیستی بود.

نوع مقاله:

پژوهشی

روش پژوهش: در این مطالعه، برگچه‌های نخل خرما با ترکیبات شامل هیدروکسید سدیم (NaOH)، اسید سولفوریک (H_2SO_4) و ان-هگزان (n-Hexane) جداگانه و به‌صورت ترکیبی تیمار شدند. ارزیابی ویژگی‌های سطحی و ساختاری از طریق آزمون زاویه تماس قطره آب، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) و استریومیکروسکوپ انجام شد. به‌منظور بررسی کارایی تیمارها در بهبود پیوند با رزین‌ها، آزمون مقاومت برشی خط چسب براساس استاندارد ASTM D7998 با دو نوع رزین فنل فرمالدهید (PF) و ایزوسیانات (pMDI) انجام شد.

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تیمارهای شیمیایی موجب تغییرات چشمگیر در ویژگی‌های سطحی برگچه شدند. زاویه تماس قطره در نمونه‌های تیمار شده کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود ترشوندگی سطح بود. نتایج FTIR حاکی از حذف یا تضعیف گروه‌های کربونیل و کربوکسیل در اثر تیمارهای شیمیایی مختلف بود که نشان‌دهنده از بین رفتن ترکیبات چرب و مومی می‌باشد. تصاویر FE-SEM و استریومیکروسکوپ نشان دادند که تیمارها موجب تغییر بافت، تخلخل و حذف پوشش‌های سطحی شدند. آزمون مقاومت برشی خط چسب نیز در تراشه‌های تیمار شده ترکیبی ان-هگزان-هیدروکسید (NH)، نتیجه بهتری داشت. در استفاده از رزین ایزوسیانات، مقاومت برشی در تیمار NH تا ۱/۹ مگاپاسکال افزایش یافت که نشان‌دهنده تعامل قوی میان سطح تیمار شده و رزین بود، در حالی که نمونه شاهد تنها حدود ۰/۲۸ مگاپاسکال ثبت شده بود.

کلیدواژه:

اصلاح شیمیایی،

پیوند رزین،

شیمی سطح،

موزدایی،

کامپوزیت‌های زیستی،

کوتیکول.

نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که برگچه‌های نخل خرما حاوی مقادیر قابل توجهی از ترکیبات مومی بوده که چسبندگی را با اختلال مواجه می‌سازند. اصلاح سطح برگچه نخل خرما با استفاده از تیمارهای شیمیایی می‌تواند به‌طور معنی‌داری چسبندگی رزین با سطح برگچه و مقاومت مکانیکی را ارتقا دهد. البته در انتخاب نوع تیمار شیمیایی علاوه بر مقاومت چسبندگی، وضعیت فیزیکی برگچه‌ها و همچنین توجه به مسائل زیست‌محیطی برای دستیابی به تولید پایدار حائز اهمیت می‌باشند. به‌طور کلی، این تحقیق مسیر بهره‌برداری پایدار از بقایای کشاورزی را در توسعه کامپوزیت‌های زیستی حاصل از برگچه نخل خرما هموار می‌سازد.

استناد: رحمت‌اللهی؛ نورمحمد، عدالت؛ حمیدرضا، مدهوشی؛ محراب، حجازی؛ سحاب، ابراهیمی؛ قنبر (۱۴۰۵). اصلاح سطحی و بهبود مقاومت برشی خط چسب در تراشه‌های حاصل از برگچه نخل خرما با استفاده از تیمارهای شیمیایی انتخابی. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۹ (۱)، ۱-۱۸. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.407901.1384>



۱. مقدمه

استفادهٔ بهینه از بقایای کشاورزی در سال‌های اخیر به‌عنوان یک راهکار پایدار برای کاهش فشار بر منابع چوبی و حرکت به‌سمت توسعهٔ پایدار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از این بقایای ارزشمند، برگچه‌های نخل خرما^۱ است که در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به مقدار فراوان موجود است و اغلب بدون استفاده بوده و یا سوزانده می‌شوند که خود مشکلات زیست‌محیطی متعددی ایجاد می‌کند [۱]. این برگچه‌ها با داشتن ساختار الیافی مناسب و در دسترس بودن در مقیاس وسیع، گزینه‌ای بالقوه برای تولید کامپوزیت‌های چوبی و فرآورده‌های مهندسی شده چوبی به‌شمار می‌روند. مزیت اصلی این کار در بهره‌برداری از یک منبع تجدیدپذیر، کاهش هزینهٔ تولید، و همزمان کمک به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از دفع بقایای کشاورزی است. در مطالعات اخیر نیز گزارش شده که استفاده از الیاف برگ خرما می‌تواند استحکام مکانیکی قابل‌قبولی در ترکیب با رزین‌ها ایجاد نماید، هرچند همچنان مشکلاتی در زمینهٔ سازگاری سطحی و چسبندگی وجود دارد [۲].

با وجود مزایای ذکرشده، کاربرد مستقیم برگچهٔ خرما در فرآورده‌های چوبی مهندسی شده با موانع جدی روبه‌رو است. سطح برگچه‌های خرما معمولاً پوشیده از موم‌ها، چربی‌ها و ترکیبات آلی-معدنی است که مانع اتصال مؤثر بین الیاف و رزین می‌شوند. این موضوع منجر به کاهش انرژی سطحی، افزایش زاویهٔ تماس قطره، ضعف در ترشوندگی و در نتیجه ایجاد پیوند ضعیف در سطح مشترک الیاف و چسب می‌شود. ضعف در چسبندگی سطحی نیز باعث افت مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های حاصل، خصوصاً در آزمون‌های برشی و کششی می‌گردد [۳]. علاوه بر این، ماهیت آبدوستی^۲ گروه‌های سلولزی در کنار وجود ترکیبات مزاحم، پایداری ابعادی این کامپوزیت‌ها را تحت تأثیر قرار داده و موجب جذب آب بالا و کاهش دوام در شرایط محیطی می‌شود. بنابراین، بدون اصلاح سطحی و حذف یا تغییر ترکیبات مزاحم، نمی‌توان انتظار داشت که برگچهٔ خرما به‌طور مؤثر در ساخت تخته‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، رویکردهای مختلفی از جمله تیمارهای شیمیایی، مکانیکی و آنزیمی پیشنهاد شده‌اند [۴]. در این میان، تیمارهای شیمیایی به‌دلیل اثرگذاری مستقیم بر حذف موم‌ها، افزایش تخلخل سطح و بهبود قطبیت الیاف، بیشترین کارایی را نشان داده‌اند. در دهه‌های اخیر، علاقه به بهره‌برداری از الیاف لیگنوسلولزی در تولید کامپوزیت‌های زیستی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. مطالعات نشان داده‌اند که چالش اصلی در این مسیر، عدم سازگاری سطحی بین ترکیبات آبگریز الیاف و ماتریس‌های رزینی آبدوست است که منجر به پیوند ضعیف و کاهش خواص مکانیکی می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، پژوهشگران به اصلاح سطحی الیاف از طریق روش‌های شیمیایی و فیزیکی روی آورده‌اند. در پژوهش‌های اخیر به بررسی تکنیک‌های اصلاح سطحی نظیر تیمار قلیایی، استری کردن، سیلان‌دهی، اکسیداسیون و اصلاح آنزیمی پرداخته شده که هر روش بسته به شرایط و پارامترهای فرآیند تأثیر متفاوتی بر انرژی سطحی، ترشوندگی و چسبندگی دارد [۵]. فناوری‌هایی چون پلاسما، نانوذره‌سازی و پوشش‌دهی نیز برای بهبود تعامل سطح الیاف معرفی شده‌اند. در مبحث پیوند بین سطح الیاف و رزین، مشخص شده است که شرایط سطح (مانند زبری، انرژی سطح و گروه‌های فعال) نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد مکانیکی نهایی کامپوزیت دارد [۶]. پژوهش حاضر با تمرکز بر اصلاح سطح برگچهٔ خرما و بهبود چسبندگی آن، تلاش دارد با استفاده از چند آزمون کلیدی، کارایی این تیمارها را بررسی نماید. نوآوری اصلی این تحقیق در ایجاد یک ارتباط روشن میان اصلاح شیمیایی سطح و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی برگچهٔ خرما نهفته است که می‌تواند کاربرد صنعتی آن را در تولید فرآورده‌های چوبی ارتقا دهد. انتظار می‌رود که حذف یا کاهش موم‌ها و ترکیبات غیرقطبی موجود در سطح برگچه، باعث افزایش انرژی سطحی و بهبود تعامل با چسب شود؛ موضوعی که نهایتاً به بهبود چسبندگی و افزایش مقاومت مکانیکی منجر می‌گردد [۷]. ضرورت انجام این پژوهش از آن جهت است که تاکنون مطالعات محدودی به‌طور جامع بر اصلاح شیمیایی برگچهٔ خرما و تحلیل همزمان خواص سطحی و مکانیکی آن متمرکز شده‌اند، در حالی که نیاز صنعت چوب به منابع جایگزین پایدار روزبه‌روز در حال افزایش است. با توجه به مساحت نخلستان‌ها در کشور ایران (۲۲۰ هزار هکتار)، مقدار تولید این مواد سالانه بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ هزار تن تخمین زده می‌شود [۱]، بنابراین، نتایج این تحقیق می‌تواند مسیر تازه‌ای برای استفادهٔ صنعتی از این ماده در تولید فرآورده‌های چوبی مهندسی

¹ Leaflets of Date Palm

² Hydrophilic

شده مانند OSB^۱ و OSL^۲ فراهم سازد و اهمیت این منبع تجدیدپذیر را بیش از پیش تقویت نماید.

۲. روش‌شناسی پژوهش

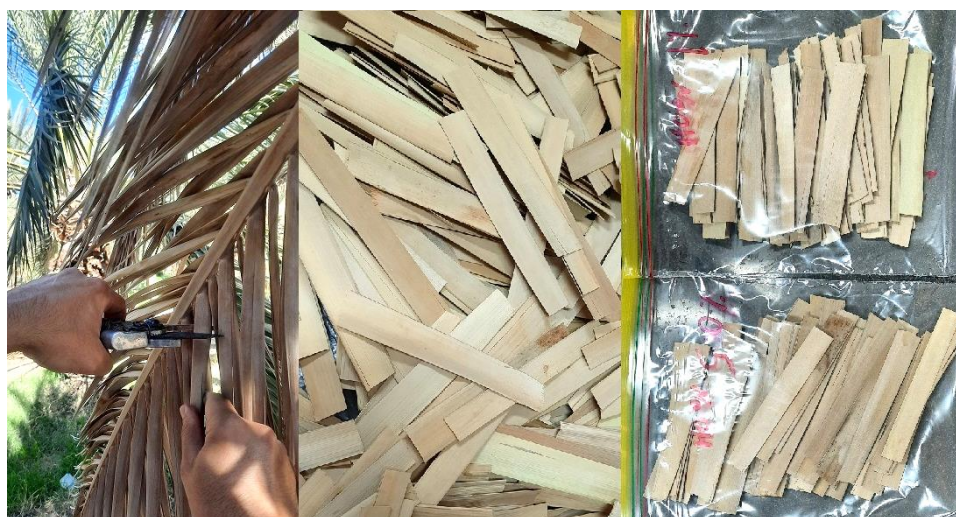
۲-۱. مواد

این مطالعه در پایلوت فرآورده‌های چوبی دانشکده مهندسی چوب و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. ماده اولیه اصلی در این پژوهش برگچه^۳ نخل خرما (*Phoenix dactylifera L.*) رقم مضافتی بود که از نخلستان‌های سراوان در استان سیستان و بلوچستان، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز کشت خرما در ایران، جمع‌آوری شد. برگچه‌ها پس از برداشت، به‌صورت دستی پاکسازی و جهت حذف گردوغبار و آلودگی‌های سطحی با فرچه تمیز شدند. سپس نمونه‌ها در شرایط محیطی و به‌دور از نور مستقیم خورشید به‌مدت ۷۲ ساعت هوا خشک شدند. برگچه‌ها به ابعاد تقریبی ۲×۱۲ سانتی‌متر بریده شده و تنها بخش‌های صاف، یکنواخت و فاقد پیچ‌خوردگی برای مراحل بعدی انتخاب شدند (شکل ۱).

برای آماده‌سازی تیمارهای شیمیایی، سه ماده اصلی طبق مشخصات جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت: ان-هگزان^۴ (درجه آزمایشگاهی) جهت حذف ترکیبات چربی‌دوست^۵ نظیر موم‌ها و چربی‌ها؛ اسید سولفوریک غلیظ برای تغییر ساختار سطحی و کاهش مواد استخراجی مزاحم، و هیدروکسید سدیم (درجه آنالیزی) به‌منظور حذف بخشی از همی‌سلولزها و افزایش نفوذپذیری در بافت. مواد شیمیایی مذکور با برند Merck آلمان تهیه شدند.

جدول ۱. مشخصات مواد شیمیایی استفاده شده جهت تیمار

ماده شیمیایی	فرمول شیمیایی	وزن مولکولی (گرم بر مول)	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	رنگ ظاهری	شرکت سازنده
هیدروکسید سدیم	NaOH	۴۰	۲/۱۳	سفید بلوری	مرک آلمان
اسید سولفوریک	H ₂ SO ₄	۹۸/۰۸	۱/۸۴	مایع بی‌رنگ	مرک آلمان
ان-هگزان	C ₆ H ₁₄	۸۶/۱۸	۰/۶۶	مایع بی‌رنگ	دکتر مجلی



شکل ۱. آماده‌سازی برگچه‌های نخل

^۱Oriented Strand Board

^۲Oriented Strand Lumber

^۳Leaflet

^۴n-Hexane

^۵Lipophilic compounds

در نهایت، برگچه‌های تیمار شده به مدت ۲۴ ساعت درون محفظه‌های خشک کن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته شده تا به رطوبت 7 ± 1 درصد برسند. کنترل رطوبت تراشه‌ها از طریق نمونه‌برداری تصادفی از تمام طبقات و با استفاده از روش آن انجام شد. تراشه‌ها پس از خشک شدن، در بسته‌بندی پلاستیکی زیپ‌دار نگهداری شدند تا برای انجام آزمون‌های مکانیکی و شیمیایی آماده باشند (شکل ۱). به منظور بررسی چسبندگی بین تراشه‌های تیمار شده، دو نوع رزین صنعتی شامل پلی‌متیلن دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات (pMDI) با نام تجاری PM200 ساخت وانهوا چین از شرکت متاسان و فنل فرمالدهید (PF) نوع رزول ساخت داخل از شرکت ایران کامپوزیت تأمین شد (جدول ۲).

جدول ۲. مشخصات رزین‌های استفاده شده

رزین	درصد جامدات	ویسکوزیته (سانتی‌پوز)	دانسیته (گرم بر میلی لیتر)	اسیدیته	درصد اسید	شرکت سازنده
ایزوسیانات	۹۹	۲۰۰	۱/۲۵	-	$\leq 0/03$	وانهوا چین
فنل فرمالدهید	۵۰	۱۲۰۰	۱/۲	۷/۲	-	ایران کامپوزیت

۲-۲-۲. روش‌ها

به منظور اصلاح سطح برگچه‌های نخل خرما و فراهم‌سازی شرایط مناسب برای افزایش چسبندگی، تیمارهای شیمیایی مختلف به صورت منفرد و ترکیبی اعمال شدند. برای این منظور، سه ماده هیدروکسید سدیم (H)، اسید سولفوریک (S) و آن-هگزان (N) انتخاب شدند. علاوه بر این، چهار تیمار تلفیقی شامل هیدروکسید سدیم-آن-هگزان (HN)، اسید سولفوریک-آن-هگزان (SN)، آن-هگزان-هیدروکسید سدیم (NH) و آن-هگزان-اسید سولفوریک (NS) نیز اعمال شدند و در مجموع هفت تیمار شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این تیمارها، حذف ترکیبات مزاحم سطحی نظیر موم‌ها، چربی‌ها، همی سلولزها و سایر مواد استخراجی بود که مانع از ایجاد اتصال قوی بین تراشه‌ها می‌شوند.

۲-۲-۲-۱. تیمار قلیایی (NaOH)

در این روش، هدف اصلی کاهش همی سلولزها و ترکیبات فنولی مزاحم و همچنین افزایش تخلخل سطح بود [۸]. برای این منظور، تراشه‌ها به مدت دو ساعت در محلول هیدروکسید سدیم با غلظت‌های ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد (w/v) و نسبت مایع به جامد ۱:۶ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در بن‌ماری گذاشته شدند. پس از آن تراشه‌ها چندین بار با آب مقطر شسته شدند تا pH به حدود ۷ برسد و سپس در آن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. نتایج حاصل از سطوح مختلف غلظت به منظور انتخاب شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲-۲-۲. تیمار اسیدی (H₂SO₄)

این تیمار با هدف کاهش مواد مزاحم سطحی و ارتقای آبدوستی سطح برگچه‌ها اجرا شد [۹]. برای این منظور از محلول اسید سولفوریک با غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ درصد استفاده شد. نسبت مایع به جامد ۱:۱۰ انتخاب شد و تراشه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و درون بن‌ماری قرار گرفتند. پس از مدت‌های زمانی متفاوت (۱، ۲ و ۳ ساعت)، تراشه‌ها از محلول خارج شده و با آب مقطر شسته شدند تا pH محلول خروجی خنثی گردد. در نهایت، نمونه‌ها در آن ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند.

۲-۲-۲-۳. تیمار با آن-هگزان (C₆H₁₄)

این روش به منظور حذف موم‌ها، چربی‌ها و ترکیبات آبگریز کوتیکول برگچه نخل خرما انجام گرفت [۱۰]. در این تیمار، تراشه‌ها در سوکسله و با نسبت حلال به جامد ۱:۱۰ تحت تیمار قرار گرفتند. مدت زمان تیمار در سه سطح ۲، ۴ و ۶ ساعت مورد بررسی قرار گرفت. پس از پایان فرآیند، تراشه‌ها برای حذف باقیمانده حلال شسته شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. شرایط مناسب تیمار براساس بیشترین بازدهی در حذف موم‌ها (نسبت موم استخراج شده به جرم اولیه)

تراشه‌ها پیش از استخراج)، انتخاب شد.

۲-۲-۴. تیمارهای ترکیبی

چهار ترکیب دو مرحله‌ای از تیمارهای فوق نیز اجرا شد تا کارایی هر تیمار در حذف ترکیبات مزاحم با دقت بیشتری ارزیابی شود. به‌عنوان نمونه، در تیمار HN ابتدا تراشه‌ها تحت تیمار قلیایی قرار گرفتند و پس از خشک شدن، تیمار با آن-هگزان انجام شد. به‌همین ترتیب، سایر ترکیب‌ها (NS و SN، NH) نیز مطابق شرایط بیان شده اعمال شدند.

۲-۳. آزمون‌ها و تحلیل‌ها

۲-۳-۱. زاویه تماس قطره

به‌منظور بررسی انرژی سطحی و تعیین میزان آبدوستی تراشه‌های برگچه نخل خرما پس از اعمال تیمارهای شیمیایی، آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس قطره انجام شد. اندازه‌گیری زاویه تماس یکی از روش‌های متداول در تعیین ویژگی‌های ترشوندگی سطح است که علاوه بر تعیین میزان آبدوستی یا آب‌گریزی، می‌تواند اطلاعاتی در مورد اثرات فوتوکاتالیستی و خواص خودتمیزشوندگی سطوح ارائه دهد [۱۱]. این آزمون با استفاده از دستگاه JIKAN CAG-20 SE و طبق استاندارد ASTM D5946-04 و به شیوه استاتیک انجام شد [۱۲]. بر این اساس قطره‌ای از آب مقطر (حدود ۴ میکرولیتر) بر سطح نمونه قرار گرفت و زاویه تماس با استفاده از یک سیستم مجهز به دوربین CCD و نرم‌افزار اختصاصی تحلیل شد. برای هر نمونه سه اندازه‌گیری انجام و میانگین نتایج به‌عنوان زاویه تماس نهایی گزارش شد. انتخاب مقاطع صاف و یکنواخت از سطح برگچه‌ها جهت ثبت دقیق نتایج ضروری بود.

۲-۳-۲. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

به‌منظور شناسایی تغییرات شیمیایی سطح تراشه‌ها پس از تیمارهای شیمیایی، آزمون FTIR مورد استفاده قرار گرفت. این روش امکان بررسی حذف یا کاهش ترکیبات مومی، کوتین و سایر اجزای چسب‌گریز را فراهم می‌آورد [۱۳]. نمونه‌ها پس از خشک شدن، آسیاب و به‌صورت قرص (KBr) آماده شدند. طیف‌ها در بازه $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ با دقت 1 cm^{-1} و ۳۲ بار اسکن ثبت شد. در این پژوهش طیف‌سنجی با استفاده از اسپکتروفتومتر FTIR مدل Tensor II ساخت شرکت Bruker انجام شد. هدف اصلی از این آزمون بررسی تغییرات شدت باندهای مشخصه مربوط به گروه‌های عاملی مانند OH ، C=O ، C-H ، CH_2 و C-O-C بود که معمولاً در ساختار موم‌ها و لیپیدهای سطحی وجود دارند. تغییر در این باندها شاخصی از حذف یا کاهش ترکیبات آبریز و در نتیجه بهبود پتانسیل چسبندگی سطحی محسوب می‌شود.

۲-۳-۴. میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)

برای بررسی تغییرات مورفولوژیکی سطحی و مشاهده ساختارهای میکروسکوپی تراشه‌ها قبل و پس از تیمار، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) ساخت شرکت Tescan استفاده شد. این آزمون امکان مشاهده حذف کوتیکول، افزایش تخلخل و باز شدن کانال‌های نفوذی را فراهم می‌کند [۱۴]. نمونه‌ها پس از خشک شدن در دمای محیط، بر روی نگهدارنده‌های فلزی با نوار کربنی نصب و با لایه‌ای از طلا به ضخامت تقریبی ۱۰ نانومتر روکش شدند تا رسانایی الکتریکی بهبود یابد [۱۵]. تصویربرداری در بزرگنمایی‌های مختلف ($\times 500$ ، $\times 1000$ ، $\times 2000$ ، $\times 5000$ و $\times 10000$) انجام شد و تصاویر حاصل برای مقایسه بین نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده مورد تحلیل قرار گرفتند.

۲-۳-۵. بررسی استریومیکروسکوپی

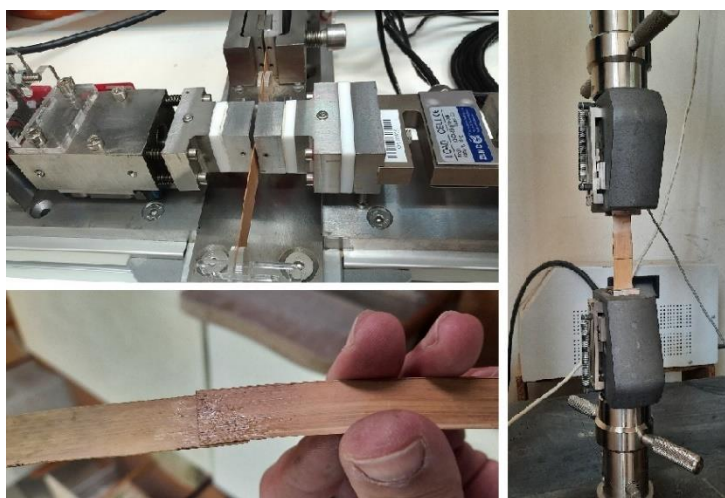
به‌منظور بررسی دقیق‌تر سطح تراشه‌های برگچه نخل خرما پس از اعمال تیمارهای شیمیایی و فرآیند چسبندگی، از استریومیکروسکوپ (Stereomicroscope) Olympus SZX16 استفاده شد. این روش امکان مشاهده سه‌بعدی سطح و نواحی شکست را با بزرگنمایی‌های پایین تا متوسط فراهم می‌آورد و برای تحلیل پیوستگی خط چسب، توزیع رزین، وجود حفرات،

جدایش‌ها و گسستگی‌های احتمالی در ناحیه چسب به‌کار گرفته شد [۱۶]. نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده انتخاب و بر روی استیج دستگاه استریو قرار داده شدند. مشاهدات در بزرگنمایی‌های مختلف (۱۰ تا ۵۰ برابر) صورت گرفت و تصاویر دیجیتال با استفاده از دوربین متصل به دستگاه ثبت شد. این تصاویر به‌عنوان مکمل آزمون‌های برشی خط چسب مورد استفاده قرار گرفتند تا ارتباط بین رفتار مکانیکی و ساختار سطحی به‌طور دقیق‌تری تحلیل شود. این روش به‌دلیل توانایی در آشکارسازی نواحی ماکروسکوپی و ریزساختارهای قابل مشاهده، ابزاری مؤثر برای ارزیابی کیفی کارایی تیمارهای شیمیایی و نوع چسب در بهبود پیوند بین تراشه‌ها محسوب می‌شود.

۲-۳-۶. آزمون مقاومت برشی خط چسب

در این آزمون از دو نوع رزین گرماسخت فنل فرمالدهید (PF) و ایزوسیانات پلیمری متیلن دی‌فنیل (pMDI) استفاده شد. به‌منظور ارزیابی چسبندگی بین تراشه‌های تیمار شده، آزمون مقاومت برشی خط چسب مطابق با استاندارد ASTM D7998 انجام شد که یکی از معیارهای کلیدی در انتخاب تیمار مناسب محسوب می‌شود. [۱۷]. برای این منظور از برگچه‌های تیمار شده با ابعاد 10×100 میلی‌متر استفاده شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا بر روی دو انتهای هر تراشه علامتی در فاصله یک سانتی‌متر از لبه ثبت شد. سپس مقدار ثابتی از رزین، معادل ۱۰ میلی‌گرم (بر مبنای جرم خشک) در هر سانتی‌متر مربع سطح، با استفاده از ابزار آزمایشگاهی در نواحی مشخص قرار گرفت و بر روی مساحت مورد نظر پراکنده شد. بر این اساس، مقدار رزین فنول فرم آلدهید به‌دلیل درصد جامدات ۵۰ درصد، به‌میزان ۲۰ میلی‌گرم اعمال شد. برای رزین PF از کربنات پتاسیم به‌عنوان سخت‌کننده و به‌میزان ۲ درصد نسبت به جرم خشک رزین استفاده شد [۱۸].

نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ارزیابی چسبندگی و رئولوژی چسب ABRES^۱ با کنترل دقیق دما و فشار، پرس شدند. دمای پرس (برای فنل فرمالدهید ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و برای ایزوسیانات ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد و فشار پرس به‌میزان ۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با دقت ۰/۱ کیلوگرم اعمال و کنترل شد. افت تنش ناشی از حرارت پرس توسط مکانیسم تعبیه شده در دستگاه فوق، جبران و مقدار فشار پرس تا پایان زمان پرس (برای فنل فرمالدهید ۶ دقیقه و برای ایزوسیانات ۴ دقیقه) ثابت باقی ماند و پس از اتمام پرس گرم، نمونه‌ها خنک‌سازی شدند. سپس به‌مدت یک هفته در شرایط کلیما نگهداری شدند تا متعادل شوند. به‌منظور انجام آزمون مقاومت برشی، با استفاده از دستگاه تست یونیورسال Comotech دو انتهای نمونه در فک کششی قرار گرفت و با وارد آوردن نیروی کششی با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه، خطوط چسب تحت تنش برشی قرار گرفته و مقاومت برشی آنها برحسب مگاپاسکال ارزیابی شد. (شکل ۲). برای هر تیمار سه تکرار در نظر گرفته شد.



شکل ۲. پرس نمونه‌ها در دستگاه ABRES (بالا)، نمونه‌های پرس شده (پایین) و آزمون مقاومت برشی در دستگاه تست یونیورسال Comotech (راست)

^۱Adhesive bonding and rheology evaluating system

۲-۴. تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌های مربوط به تیمارهای شیمیایی و نوع چسب در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی انجام شد. به منظور تعیین اثر عوامل متغیر در نتایج آزمون مقاومت برشی، از تکنیک تجزیه واریانس دو طرفه و برای مقایسه میانگین‌ها و گروه‌بندی از آزمون توکی استفاده شد ($P < 0.05$). برای نتایج زاویه تماس آنالیز واریانس یک طرفه و برای مقایسه میانگین‌ها و گروه‌بندی، آزمون دانت به کار گرفته شد ($P < 0.05$). نتایج کلیه آزمایش‌ها به وسیله نرم‌افزار MiniTab20 تجزیه و تحلیل شدند.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. تأثیر تیمارها

در تیمار با هیدروکسید سدیم، علاوه بر تغییر رنگ زیاد، هم‌کشیدگی و تغییر فرم شدیدی در تراشه‌ها مشاهده شد که می‌تواند ناشی از تخریب قابل توجهی در پارانشیم‌ها و همی سلولزها باشد. تغییر رنگ به قهوه‌ای تیره و همچنین از دست دادن درصد مواد ساختاری زیاد از معایب این تیمار است که می‌تواند کاربرد نهایی را محدود کند. این تغییرات مطابق با گزارش‌های Wang و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد که قلیاشویی را به عنوان روشی مؤثر در حذف همی سلولزها اما با خطر تغییر رنگ معرفی کرده‌اند [۸]. با توجه به معایب ایجاد شده، شرایط مناسب برای تیمار شامل ۱۵ درصد هیدروکسید سدیم نسبت به جرم خشک ماده اولیه و مدت زمان ۲ ساعت تعیین شد. ویژگی مثبت تیمار با اسید سولفوریک عدم تغییر رنگ و ابعاد نمونه‌ها بود و شدت تخریب ساختار نسبت به تیمار قلیایی کمتر بود. این نتیجه با یافته Jiang و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی داشت که هیدرولیز ملایم اسیدی را روشی مناسب برای حذف محدود همی سلولزها معرفی کرده‌اند [۹]. شرایط مناسب برای تیمار شامل ۱۰ درصد اسید سولفوریک نسبت به جرم خشک ماده اولیه و زمان ۶۰ دقیقه به دست آمد.



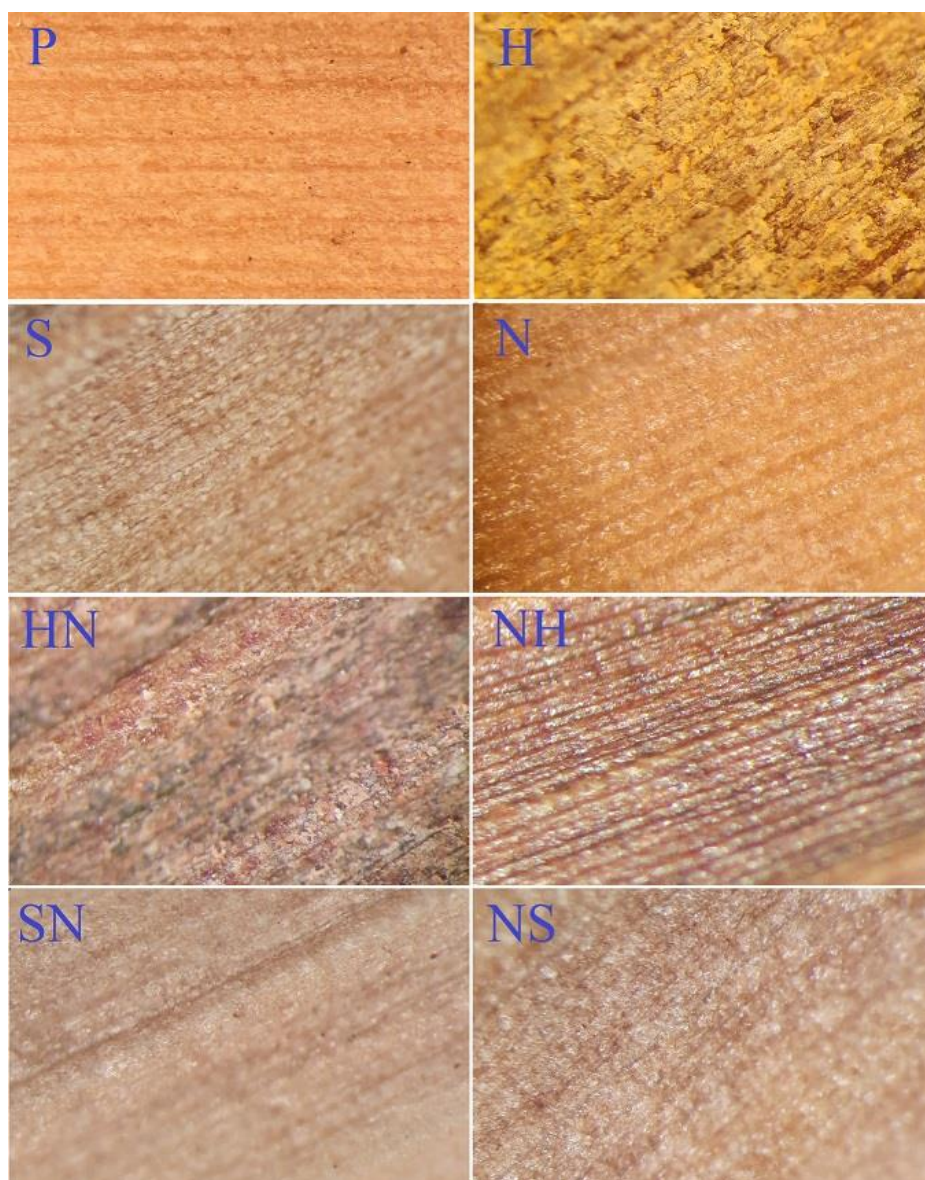
شکل ۳. تراشه‌های حاصل از برگچه قبل و پس از تیمارهای شیمیایی: نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با؛ هیدروکسید سدیم (H)، ان-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید^۱ (NS) و اسید-هگزان (SN)

^۱ منظور از واژه اسید در تیمارهای شیمیایی، اسید سولفوریک می‌باشد و به منظور سهولت مطالعه به صورت مختصر نوشته شده است.

نتایج تیمار با ان-هگزان نشان داد که این روش می‌تواند بدون تغییرات ابعادی و تخریب ساختار فیبری، ترکیبات مومی و چربی موجود در برگچه را استخراج نماید. در زمان ۲، ۴ و ۶ ساعت به ترتیب به میزان ۷/۳، ۷/۸ و ۸/۲ درصد از ترکیبات مذکور حذف شد. علاوه بر آن، روشن‌تر شدن رنگ تراشه‌ها پس از تیمار به‌عنوان یک ویژگی ظاهری مثبت تلقی شد. این یافته نشان‌دهنده ماهیت انتخابی ان-هگزان در حذف موم‌ها و آلکان‌های زنجیره بلند است، بدون آنکه ساختار فیبری دچار تغییر اساسی شود (شکل ۳). این مشاهدات با نتایج Onoja و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر کارایی ان-هگزان در حذف پوشش‌های مومی همخوانی داشت [۱۰]. با توجه به مقادیر موم خارج شده، برای تیمار ان-هگزان مدت زمان ۲ ساعت انتخاب شد.

۳-۲. تصاویر استریومیکروسکوپ

تصاویر استریومیکروسکوپ نشان داد که تیمارهای شیمیایی باعث تغییرات آشکار در ظاهر و بافت سطح برگچه‌های نخل خرما شدند (شکل ۴). در نمونه شاهد، سطح صاف و براق به دلیل وجود موم‌ها و ترکیبات استخراجی مشاهده شد که مانع پیوند مناسب با چسب است.



شکل ۴. تصاویر استریومیکروسکوپ از سطح برگچه نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده: نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با؛ هیدروکسید سدیم (H)، ان-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید (NS) و اسید-هگزان (SN)

تیمار هیدروکسید سدیم موجب مات‌شدگی و افزایش تخلخل سطح شد که بیانگر حذف بخشی از لیگنین و همی سلولزها است. ان-هگزان براقیت سطح را کمی کاهش داد و تغییر محسوسی در بافت سطح برگچه تحت تأثیر این تیمار قابل تشخیص نبود. اسید سولفوریک سطح یکنواخت‌تر و تیره‌تری ایجاد کرد که حاکی از تخریب ملایم ماتریس لیگنین است. تیمارهای ترکیبی، هگزان-هیدروکسید و اسید-هگزان بهترین نتایج را داشتند و سطوحی تمیز، مات و نسبتاً یکنواخت ایجاد کردند. در مقابل، هگزان-اسید موجب سطح ناهمگن و ترک‌خورده شد. این نتایج با مشاهدات FE-SEM و آزمون‌های مکانیکی هم‌راستا بوده و نشان می‌دهد اصلاح سطح، به‌ویژه در تیمارهای اسید-هگزان و هگزان-هیدروکسید، نقش کلیدی در بهبود چسبندگی دارد [۱۹].

۳-۳. زاویه تماس

نتایج آزمون زاویه تماس قطره نشان داد که تیمارهای شیمیایی اثر معنی‌داری بر شیمی سطحی برگچه نخل خرما دارند (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمارهای اصلاحی بر زاویه تماس

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P
تیمار شیمیایی	۷	۳۲۲۵	۴۶۰/۸	۴/۷۷	۰/۰۰۵
خطا	۱۶	۱۵۴۷	۹۶/۷	-	-
کل	۲۳	۴۷۷۲	-	-	-

نمونه شاهد با زاویه تماس میانگین ۸۱/۵ درجه، ماهیتی آب‌گریز سطح برگچه را نشان داد که ناشی از وجود لایه موم‌ها و ترکیبات چربی سطحی است. پس از اعمال تیمارها، تغییرات قابل توجهی در زاویه تماس مشاهده شد. تیمار اسید سولفوریک بیشترین کاهش زاویه تماس را ایجاد کرد (۲۳/۵ درجه)، که نشان‌دهنده افزایش چشمگیر آبدوستی سطح و حذف مؤثر موم‌ها بود. در تیمار هیدروکسید سدیم نیز زاویه تماس به ۵۴ درجه کاهش یافت و بیانگر افزایش متوسط آبدوستی ناشی از حذف بخشی از لیگنین و چربی‌ها است. زاویه تماس در تیمار ان-هگزان به مقدار ۶۶ درجه رسید که حذف جزئی موم‌ها و باقی‌ماندن بخش عمده‌ای از ترکیبات آب‌گریز سطحی را تأیید می‌کند. در تیمارهای ترکیبی نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. تیمار هگزان-اسید (NS) کمترین زاویه تماس (۴۵ درجه) را در بین ترکیبات ثبت کرد که بیانگر اثر هم‌افزایی این دو تیمار در افزایش انرژی سطحی و آبدوستی بود. در مقابل، تیمار هیدروکسید-هگزان (HN) با زاویه ۶۲ درجه رفتار مشابه تیمارهای تک مرحله‌ای داشت و کارایی آن در حذف موم‌ها کمتر بود. تیمار اسید-هگزان با زاویه ۶۱ درجه و تیمار هگزان-هیدروکسید (NH) با زاویه ۵۰ درجه نیز نشان دادند که ترتیب اجرای تیمار، نقش مهمی در شدت تغییرات سطحی دارد (شکل‌های ۵ و ۶).

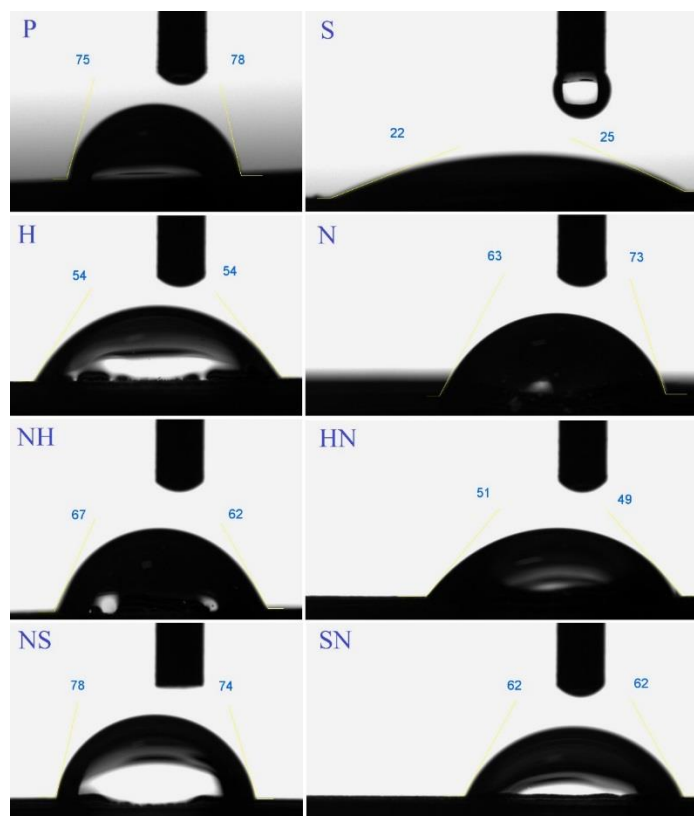
به‌طور کلی، کاهش زاویه تماس به معنی افزایش آبدوستی و انرژی سطحی است که می‌تواند به بهبود ترشوندگی و نفوذ رزین در سطح منجر شود و در نهایت کیفیت چسبندگی را ارتقا دهد. این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند تیمارهای شیمیایی با حذف موم‌ها و تغییر ساختار سطحی، چسبندگی بسترهای لیگنوسولوزی را بهبود می‌بخشند [۱۱]. البته کاهش بیش از حد زاویه تماس نیز باعث نفوذ بیش از حد رزین در بافت بستر می‌شود و موجب ایجاد اتصال گرسنه^۱ و نهایتاً افت مقاومت می‌گردد. بنابراین در بخش نتایج مربوط به مقاومت برشی مجدداً یافته‌های مربوط به زاویه تماس مورد توجه قرار خواهد گرفت. بر این اساس، می‌توان گفت انتخاب نوع و ترتیب تیمار از عوامل کلیدی در اصلاح سطح تراشه‌های حاصل از برگچه نخل خرما و آماده‌سازی آن برای کاربرد در فرآورده‌های مهندسی شده چوب است.

۳-۴. آنالیز FTIR

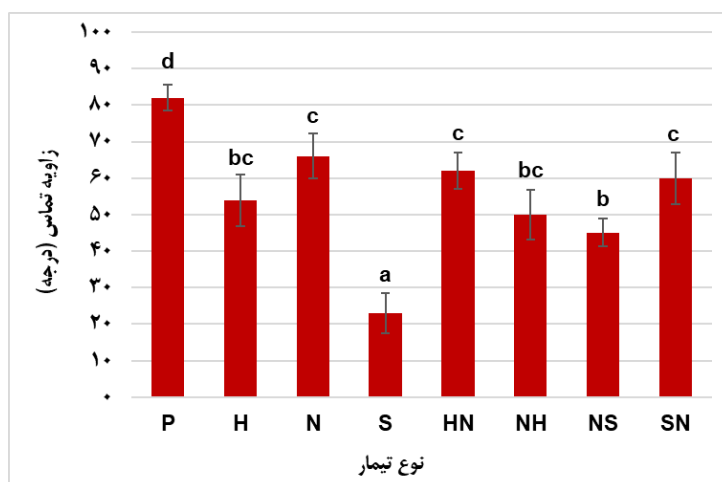
نتایج حاصل از آنالیز FTIR برگچه‌های نخل خرما نشان داد که اعمال تیمارهای شیمیایی موجب ایجاد تغییرات معنی‌دار در گروه‌های عاملی سطحی شده است (شکل ۷). طیف‌های به‌دست‌آمده، باندهای مشخصه ترکیبات لیگنوسولوزی شامل سلولز، همی سلولز، لیگنین،

^۱Starved Joint

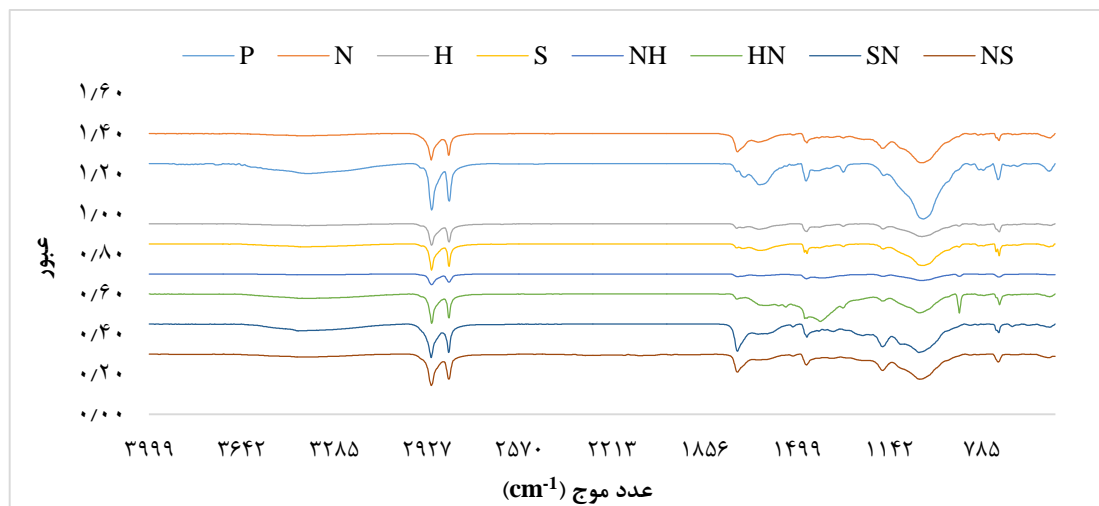
پکتین و اسیدهای چرب را نشان می‌دهند. کاهش شدت پیک پهن در ناحیه 3356 cm^{-1} که مربوط به گروه‌های هیدروکسیل ساختار سلولز است، در تیمارهای NH و NS مشاهده شد. پیک‌های مشاهده شده در محدوده $2850-2919\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن پیوندهای C-H در پلی‌ساکاریدها (مانند سلولز و همی‌سلولز) نسبت داده می‌شوند. علاوه بر این، مواد استخراجی (مانند لیپیدها و اسیدهای چرب) نیز به دلیل دارا بودن زنجیره‌های هیدروکربنی، نقش قابل توجهی در شدت این باندها ایفا می‌کنند. بنابراین شدت این پیک‌ها در تیمارهای H و NH بیانگر حذف بخشی از ترکیبات مومی از سطح الیاف است.



شکل ۵. تصاویر آزمون زاویه تماس قطره بر روی سطح برگچه‌ها قبل و بعد از تیمارهای شیمیایی: نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با: هیدروکسید سدیم (H)، ان-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید (NS) و اسید-هگزان (SN)



شکل ۶. اثر تیمار اصلاحی بر زاویه تماس قطره برای تیمارهای مختلف: نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با: هیدروکسید سدیم (H)، ان-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید (NS) و اسید-هگزان (SN)



شکل ۷. طیف‌های FTIR تراشه بر گجته نخل خرما: نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با؛ هیدروکسید سدیم (H)، ان-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید (NS) و اسید-هگزان (SN)

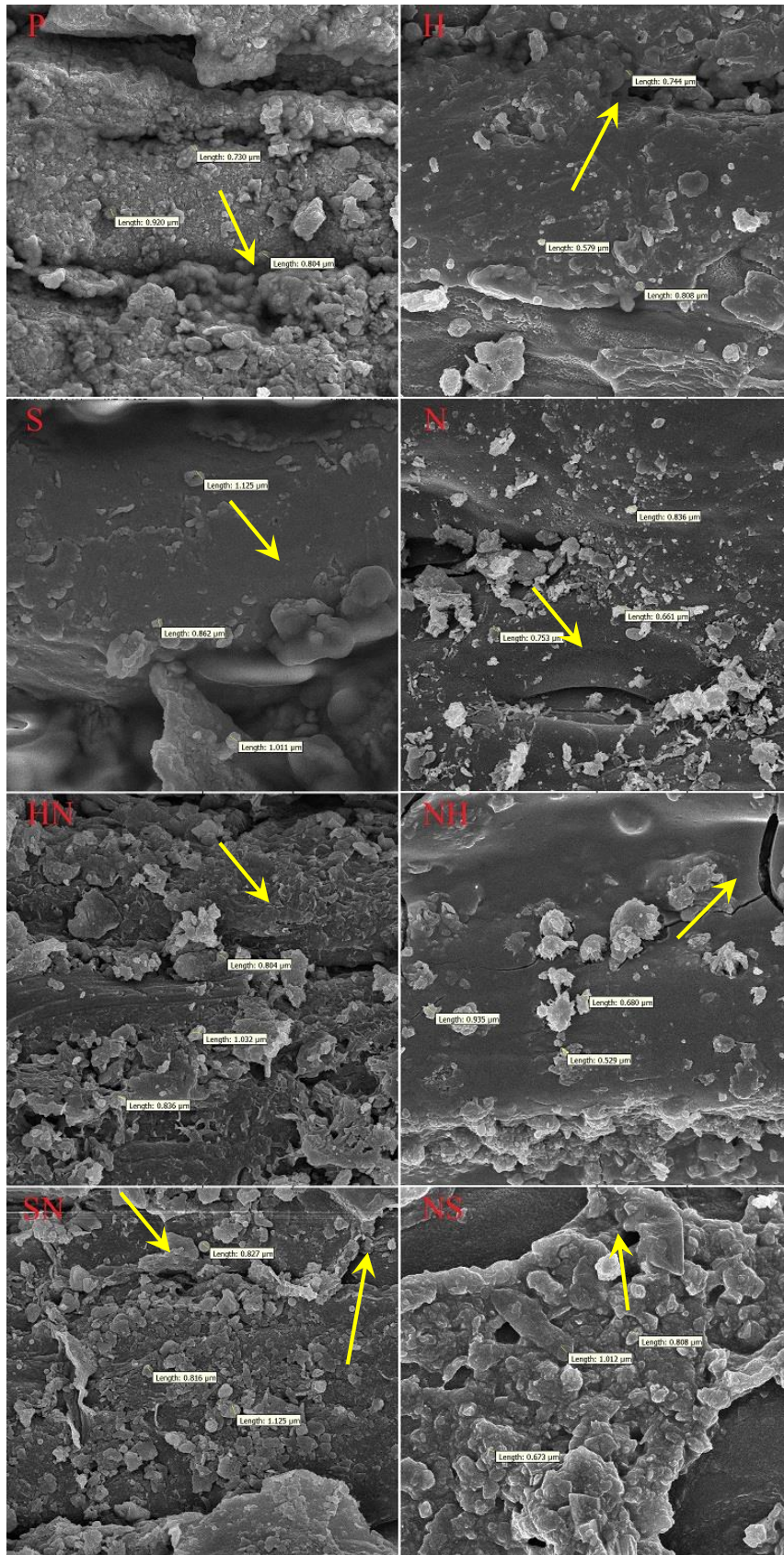
پیک‌های مشاهده شده در محدوده 1735 cm^{-1} به گروه‌های کربونیل و کربوکسیل همی سلولزها و اسیدهای چرب آلیفاتیک تشکیل دهنده بخش مومی الیاف مربوط می‌شود. شدت این پیک در تیمارهای قلیایی و اسیدی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته یا به‌طور کامل حذف شده است که این امر به تخریب همی سلولزها و حذف موم‌ها نسبت داده می‌شود. همچنین شدت پیک واقع در 1428 cm^{-1} که به ساختارهای مرتبط با لیگنین نسبت داده می‌شود، در تیمارهای اسیدی کاهش یافته است [۱۳، ۲۰].

۳-۵. تصاویر FE-SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۸) تغییرات قابل توجهی را در مورفولوژی سطح تراشه خرما پس از تیمارهای شیمیایی مختلف نشان دادند. در نمونه شاهد، سطح نسبتاً فشرده، دارای حفرات نسبی و پوشیده از لایه‌های مومی بود که مانع نفوذپذیری و ایجاد پیوند مؤثر شد. تیمار هیدروکسید سدیم سطحی همگن و آغشته به ذرات ریز و پراکنده و همراه با حفرات ریز ایجاد نمود. تیمار هگزان صرفاً بخشی از موم‌ها را زدود و سطحی نسبتاً یکنواخت ولی مملو از ذرات پراکنده برجا گذاشت. در تیمار اسید سولفوریک، سطح یکنواخت‌تر و صاف‌تر، بدون حفرات و بدون ذرات ریز بلکه با ذرات به‌هم پیوسته و کلوخه شده مشاهده شد. در تیمارهای ترکیبی، اثر هم‌افزایی آشکار بود. ترکیب هگزان-هیدروکسید سدیم سطحی یکنواخت ولی دارای ترک ایجاد نمود که آغشته به ذرات پراکنده با اندازه ریز تا کلوخه‌های متوسط ایجاد نمود. در حالی که ترتیب معکوس (هیدروکسید-هگزان) سطحی متخلخل و مملو از ذرات ریز تا متوسط حاصل از تخریب ناچیز را نشان داد. تیمار هگزان-اسید حفرات با اندازه متوسط ایجاد نمود و سطح آن آغشته به توده‌های بزرگ بود. در مقابل، تیمار اسید هگزان سطح غیر یکنواخت همراه با حفرات ریز و آغشته به ذرات ریز تا متوسط برجا گذاشت. این یافته‌ها با گزارش‌های اخیر درباره اصلاح سطح الیاف لیگنوسلولزی هم‌راستا است که نشان داده‌اند تیمارهای قلیایی و ترکیبی باعث افزایش تخلخل سطح، ایجاد میکرو حفره‌ها و بهبود چسبندگی با رزین می‌شوند [۱۴، ۱۵]. همچنین، مطالعاتی بر روی تیمارهای غیرقطبی مانند ان-هگزان تأیید کرده‌اند که حذف موم‌ها و رزین‌های سطحی به‌تنهایی کافی نیست و اغلب نیازمند ترکیب با تیمارهای قوی‌تر برای دستیابی به سطحی مناسب است [۲۱].

۳-۶. مقاومت برشی خط چسب

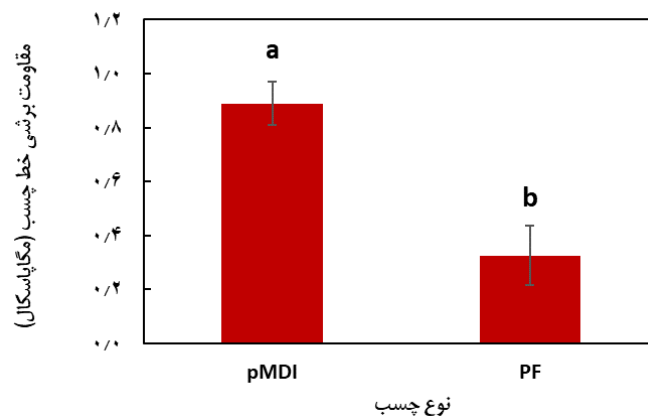
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع رزین و نوع تیمار شیمیایی بر مقاومت برشی خط چسب معنی‌دار است (جدول ۴). شکل ۹ بیانگر آن است که رزین ایزوسیانات به‌دلیل توانایی واکنش با گروه‌های هیدروکسیل سطح، پیوندهای مقاوم‌تری نسبت به فنل فرمالدهید ایجاد می‌کند (۱۶۶ درصد).



شکل ۸. تصاویر FE-SEM نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده (بزرگنمایی $\times 5000$): نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با: هیدروکسید سدیم (H)، آن-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید (NS) و اسید-هگزان (SN)

جدول ۴. تجزیه واریانس مقادیر مقاومت برشی خط چسب

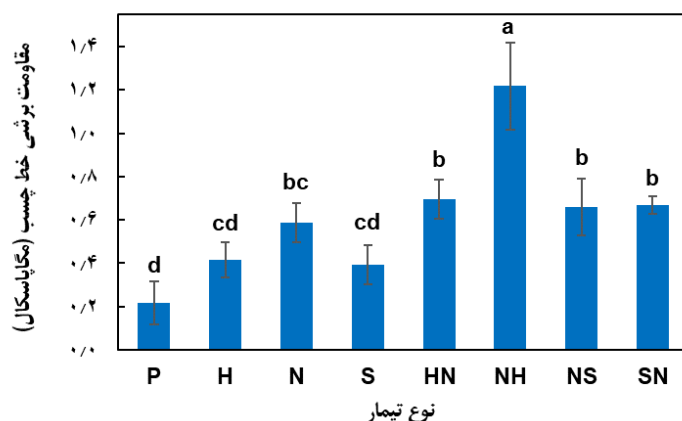
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P
نوع چسب	۱	۶/۳۳	۶/۳۳	۲۴۳/۴	۰/۰۰۰
تیمار اصلاحی	۷	۶/۲۲	۰/۸۹	۳۴/۰۲	۰/۰۰۰
نوع چسب × تیمار اصلاحی	۷	۳/۲۷۷	۰/۴۷	۱۷/۸۲	۰/۰۰۰
خطا	۶۴	۱/۶۷۲	۰/۰۲۶	-	-
کل	۷۹	۱۷/۴۹	-	-	-



شکل ۹. اثر مستقل نوع چسب بر مقاومت برشی اتصال خط چسب: چسب فنل فرم آلدهید (PF) و چسب ایزوسیانات (pMDI)

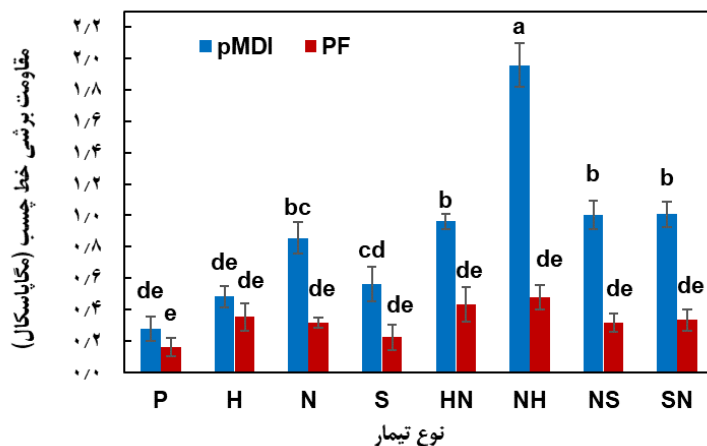
ترکیب تیمارهای قلیایی و غیرقطبی عملکرد مناسبی را در هر دو نوع رزین فراهم آورد (شکل ۱۰). این یافته‌ها با مطالعات قبلی همخوانی دارد که نشان داده‌اند آماده‌سازی سطحی الیاف لیگنوسلولزی از طریق حذف موم‌ها و افزایش گروه‌های قطبی، مقاومت مکانیکی و چسبندگی کامپوزیت‌ها را بهبود می‌دهد [۱۸، ۲۲]. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج مقاومت برشی لازم است نتایج زاویه تماس نیز مجدد مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که مشخص شد بیشترین زاویه تماس (۸۱/۵ درجه) و کمترین مقدار مقاومت برشی خط چسب در تراشه‌های شاهد به‌دست آمد. انتظار می‌رفت در تراشه‌های تیمار شده با اسید که کمترین مقدار زاویه تماس حاصل شد، بالاترین مقدار مقاومت خمشی به‌دست آید ولی این‌طور نبود و بالاترین مقدار مقاومت خمشی در تراشه‌های تیمار شده با هگزان-هیدروکسید حاصل شد. در این تیمار زاویه تماس ۵۰ درجه به‌دست آمد ولی نمی‌توان این مقدار را به‌عنوان زاویه تماس بهینه معرفی نمود چراکه تیمار هیدروکسید و هگزان-اسید هم زوایایی تقریباً نزدیک به ۵۰ درجه داشتند ولی مقادیر مقاومت برشی خط چسب در آنها به تیمار هگزان-هیدروکسید نرسید. این مسئله نشان می‌دهد علاوه بر مسئله زاویه تماس و ترشوندگی، وجود ترکیبات غیرقطبی در ساختار برگچه که در اثر حرارت پرس گرم تبخیر شده یا به جریان می‌افتند نیز باعث تغییر شیمی سطح برگچه در اثر حرارت پرس گرم شده و عاملی تعیین‌کننده در چسبندگی اجزا می‌باشد. آزمون مقاومت برشی خط چسب نشان داد که تمامی تیمارهای شیمیایی، موجب بهبود معنی‌دار چسبندگی تراشه‌ها نسبت به نمونه شاهد شدند. در نمونه شاهد، کمترین مقاومت برشی مشاهده شد (۰/۱۶ مگاپاسکال با رزین فنل‌فرمالدهید و ۰/۲۸ مگاپاسکال با رزین ایزوسیانات) که بیانگر وجود لایه‌های مومی و ساختار سطحی با تخلخل بالا و در نتیجه چسبندگی ضعیف نمونه شاهد است. همچنین بالاترین مقدار مقاومت برشی در خط چسب با رزین ایزوسیانات در نمونه هگزان-هیدروکسید به ثبت رسید که حاکی از اصلاح همزمان شیمیایی و فیزیکی سطح است. در رزین فنل‌فرمالدهید، تیمارهای هگزان (۰/۳۳ مگاپاسکال) و هیدروکسید سدیم (۰/۳۵ مگاپاسکال) باعث بهبود قابل توجهی شدند. پیک مشاهده شده در محدوده 1735 cm^{-1} به گروه‌های کربونیل و کربوکسیل اسیدهای چرب آلیفاتیک تشکیل‌دهنده بخش مومی برگ مربوط می‌شود. شدت این پیک در تیمارهای هگزانی و قلیایی به‌میزان زیادی

کاهش یافته و یا به‌طور کامل حذف شده است که این امر نشان‌دهنده حذف ترکیبات چرب و بهبود اتصال می‌باشد. به‌ویژه در ترکیب‌های ترکیبی و به‌طور مشخص در تیمارهای پی‌درپی هگزان و هیدروکسید سدیم اثر این حذف با دارا بودن بیشترین مقاومت برشی بسیار مشهود می‌باشد، به‌نحوی که بیشترین مقادیر به‌ترتیب مربوط به تیمارهای ان-هگزان-هیدروکسید (۰/۴۳ مگاپاسکال) و هیدروکسید-ان-هگزان (۰/۴۸ مگاپاسکال) بود که نشان‌دهنده هم‌افزایی قلیایی‌سازی و چربی‌زدایی در افزایش تخلخل سطح، حذف موم‌ها و آشکارسازی گروه‌های قطبی است. تیمارهای اسیدی و ترکیب‌های مرتبط مقادیر پایین‌تری داشتند (۰/۲۲-۰/۳۴ مگاپاسکال) که بیانگر تخریب ناهمگون و باقی‌ماندن ترکیبات ممانعت‌کننده است.



شکل ۱۰. اثر مستقل نوع تیمار اصلاحی سطح بر مقاومت برشی اتصال خط چسب: نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با؛ هیدروکسید سدیم (H)، ان-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید (NS) و اسید-هگزان (SN).

در رزین ایزوسیانات، تمامی تیمارها نسبت به شاهد بهبود قابل توجهی داشتند. مجدداً تیمار هگزان-هیدروکسید (HN) بالاترین میانگین را با ۱/۹۶ مگاپاسکال نشان داد، که حاکی از سازگاری بالای سطح اصلاح‌شده با گروه‌های واکنشی ایزوسیانات و تشکیل پیوندهای کووالانسی پایدار است. تیمارهای ترکیبی هیدروکسید-هگزان، اسید-هگزان و هگزان-اسید نیز عملکرد مناسبی در محدوده ۱ مگاپاسکال داشتند، در حالی که تیمارهای منفرد ان-هگزان (۰/۸۶ مگاپاسکال)، هیدروکسید (۰/۴۸ مگاپاسکال) و اسید (۰/۵۶ مگاپاسکال) عملکرد ضعیف‌تری نشان دادند.



شکل ۱۱. اثر متقابل نوع چسب و نوع تیمار اصلاحی سطح بر مقاومت برشی اتصال خط چسب: نمونه شاهد (P) و نمونه‌های تیمار شده با؛ هیدروکسید سدیم (H)، ان-هگزان (N)، اسید سولفوریک (S)، هیدروکسید-هگزان (HN)، هگزان-هیدروکسید (NH)، هگزان-اسید (NS) و اسید-هگزان (SN). چسب فنل فرم آلدهید (PF) و چسب ایزوسیانات (pMDI)

نتایج اثرات متقابل نوع رزین و نوع تیمار شیمیایی نشان داد که در مورد تراشه‌های شاهد (P)، و تیمار شده با هیدروکسید سدیم (H) و تیمار شده با اسید سولفوریک (S)، بین مقادیر مقاومت برشی دو چسب مختلف به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. این در حالی است که در تمامی تیمارهای حاوی ان-هگزان (تیمارهای خالص و تیمارهای ترکیبی)، اختلاف مقادیر مقاومت برشی خط چسب بین دو رزین مختلف از لحاظ آماری معنی‌دار بوده است.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهبود ویژگی‌های سطحی تراشه حاصل از برگچه نخل خرما برای افزایش چسبندگی در تولید فرآورده‌های مهندسی شده نظیر OSB و OSL انجام شد. نتایج نشان داد که لایه کوتیکولی سرشار از موم‌ها، اسیدهای چرب و ترکیبات استخراجی، اصلی‌ترین مانع برای برقراری پیوند مؤثر با رزین‌های صنعتی است و حذف یا کاهش این لایه پیش‌شرط اساسی برای دستیابی به عملکرد چسبندگی مطلوب محسوب می‌شود. به کارگیری تیمارهای شیمیایی منفرد و ترکیبی (هیدروکسید سدیم، اسید سولفوریک و ان-هگزان) تغییرات قابل توجهی در ساختار و شیمی سطح ایجاد کرد. آزمون زاویه تماس نشان داد که این تیمارها با کاهش زاویه تماس و اصلاح ویژگی‌های آب‌دوستی، شرایط بهتری برای ترشوندگی سطح فراهم آوردند. نتایج طیف‌سنجی FTIR و مشاهدات از طریق استریومیکروسکوپی و FESEM نیز مؤید حذف ترکیبات مومی، افزایش تخلخل و آشکارسازی گروه‌های عاملی قطبی بودند که همگی در ارتقای تعامل سطح تراشه با رزین نقش کلیدی داشتند. آزمون مقاومت برشی خط چسب نشان داد که اغلب تیمارها موجب افزایش چشمگیر استحکام چسبندگی شدند. تیمار ترکیبی هیدروکسید سدیم-ان-هگزان بالاترین مقادیر مقاومت برشی را نشان داد و بیشترین کارایی را در اصلاح سطح به همراه داشت، هرچند تولید پساب قلیایی و اثرات زیست‌محیطی استفاده گسترده آن را با محدودیت مواجه می‌کند. مقدار بالای مقاومت برشی خط چسب می‌تواند ناشی از افزایش مقاومت بافت تراشه‌ها تحت تأثیر دانسیته نیز باشد. به عبارت دیگر، تراشه‌ها در تیمارهای حاوی هیدروکسید سدیم دچار همکشیدگی شدید و افزایش دانسیته شدند و این مسئله موجب افزایش مقاومت مکانیکی تراشه و عملکرد آن در آزمون شد. در مقابل، تیمارهای حاوی اسیدسولفوریک علی‌رغم فراهم نمودن زاویه تماس کمتر و بهبود ویژگی ترشوندگی، مقاومت برشی متوسط داشتند که این مسئله می‌تواند ناشی از تخریب شیمیایی هلوسلولز و کاهش مقاومت خودچسبندگی^۱ بافت برگچه باشد. در سایر تیمارهای حاوی ان-هگزان نیز مقاومت برشی در سطح متوسط (۱ مگاپاسکال) به دست آمد. با توجه به اهمیت اثرات زیست‌محیطی، لزوم بازیابی مواد شیمیایی، حفظ ظاهر تراشه‌ها و مقاومت ذاتی بافت آنها، تیمار منفرد با ان-هگزان را می‌توان به عنوان گزینه‌ای مناسب برای کاربرد صنعتی پایدار انتخاب نمود. به طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان داد که انتخاب تیمار شیمیایی باید علاوه بر عملکرد مکانیکی، با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و مسئله تولید پایدار انجام گیرد. این رویکرد می‌تواند مسیر بهره‌برداری صنعتی از بقایای کشاورزی نظیر برگچه نخل را در توسعه کامپوزیت‌های زیستی هموار ساخته و جایگزین‌هایی کارآمد و پایدار برای مواد چوبی متداول فراهم آورد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

^۱Cohesion

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی آقای نورمحمد رحمت‌اللهی و همچنین هزینه شخصی نامبرده انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش‌ها و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی فازهای پژوهش به تفکیک، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی مقدماتی پژوهش، نظارت بر مراحل مقدماتی پژوهش، کمک در بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر روش‌های مرتبط با مباحث شیمیایی پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده پنجم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در مطالعه و بازبینی مقاله.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

- [1] Hosseinkhani, H. (2015). MDF production from date palm pruning residues in pilot plant scale. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 29(4), 591-604. (In Persian)
- [2] Ghorri, W., Saba, N., Jawaid, M. & Asim, M. (2018). A review on date palm (*Phoenix dactylifera*) fibers and its polymer composites. *Materials Science and Engineering*, 33(2), 89-100.
- [3] Rami, K., Wissam, I. & Saviour, A. (2021). New Constituents from the Leaves of Date Palm (*Phoenix dactylifera L.*) of Saudi Origin. *Journal of Molecules*, 26(4192), 39-48.
- [4] Abdeldjebbar, R., Hamouine, A., Fouchal, B. & Labbaci. (2018). Effects of Treated Date Palm Fiber on Durability of Stabilized Earth Blocks (SEB). *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(5), 293-305.
- [5] Karthik, A., Bhuvaneshwaran, M., Senthil Kumar, M.S., Palanisamy, S. & Ayrilmis, N. (2024). A Review on Surface Modification of Plant Fibers for Enhanced Properties of Biocomposites. *Chemistry Select*, 9(21), 234-245.
- [6] Lee, C. H. (2021). Importance of Interfacial Adhesion Condition on the Properties of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Polymers*, 32(7), 421-434.
- [7] Al Bulushi, K., Thomas, M., Attard, M. & Andrew, J. (2018). Optimisation and economic evaluation of the supercritical carbon dioxide extraction of waxes from waste date palm (*Phoenix dactylifera*) leaves. *Journal of Cleaner Production*, 24(8), 78-89.
- [8] Wang, W., Wang, X., Zhang, Y., Yu, Q. & Tan, X. (2020). Effect of sodium hydroxide pretreatment on physicochemical changes and enzymatic hydrolysis of herbaceous and woody lignocelluloses. *Industrial Crops & Products*, 199(155041), 121-139.
- [9] Jiang, H., Nie, J., Zeng, L., Zhu, F., Gao, Z., Zhang, A., Xie, J. & Chen, Y. (2024). Selective Removal of Hemicellulose by Diluted Sulfuric Acid Assisted by Aluminum Sulfate. *Journal of Molecules*, 20(9), 98-109.
- [10] Onoja, A., Usman, S., Abdullahi, A., Jacob, A., Ocheme, G., Sheneni, V. & Audu, A. (2023) Extraction and Characterization of Oil from Date Palm Seed (*Phoenix Dactylephera*) using n-hexane. *FUDMA Journal of Sciences*, 121(8):184-198.

- [11] Dawood, N. (2021). Surface modification of date palm leaves by cold plasma treatment. *Journal of King Saud University*, 33(101465), 203-230.
- [12] ASTM D5946-04. (2018). Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [13] Oushabi, A., Sair, S., Abboud, Y., Tanane, T. & El Bouari, A. (2017). An experimental investigation on morphological, mechanical and thermal properties of date palm particles reinforced polyurethane composites as new ecological insulating materials in building. *Case Studies in Construction Materials*, 7(2), 128-137.
- [14] Khelil, R., Jarde, E., Hurtado, F., Hadji. & Snaullt, M (2016). Structural and composition of the wax of the datepalm, *Phoenix dactylifera L.*, from the septentinal Sahra. *Scientia Horticulturae*, 201(12), 238-246.
- [15] Madhoushi, M., Malakani, A., Ebrahimi, Gh. & Rashidi, A. (2022). Influence of spherical-shaped carbon nanoparticles on the mechanical properties of a foamed sugarcane bagasse/ polypropylene composite. *Industrial Crops & Products*, 172(114041), 112-122.
- [16] Edalat, H.R., Faezipour, M., Doosthoseini, K. & Tabarsa, T. (2017). The effect of adhesive concentration and strand moisture on adhesive penetration pattern in core and middle layers of Oriented Strand Board (OSB). *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 24(1), 131-143. (In Persian)
- [17] ASTM International. (2015). ASTM D7998-15: Standard Test Method for Determining Bond Strength of Adhesives in Laminated Wood Products. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [18] Fitriani, F., Lubis, M.A.R., Hadi, Y.S., Sari, R.K., Maulana, M.I., Kristak, L., Iswanto, A.H., Mardawati, E., Reh, R. & Sedliacik, J. (2023). Adhesion and Cohesion Strength of Phenol-Formaldehyde Resin Mixed with Different Types and Levels of Catalyst for Wood Composites. *Journal of Composites Science*, 7(8), 310-323.
- [19] Sahula, L., Sedivka, P., Zachara, T. & Boruvka, V. (2023). The effect of chemical modification of the surface of the glued surface on the strength of the structural joint of wood strand. *Central European Forestry Journal*, 45(8), 101-119.
- [20] Al-Rajabi, M & Haan, T. (2022). Green extraction method of cellulose fibers from oil palm empty fruit bunches. *Jurnal Kejuruteraan*, 56(6), 212-224.
- [21] Vigneshwaran, S., Sundarakannan, R., John, K.M., Joel Johnson, R.D., Prasath, K.A., Ajith, S. & Uthayakumar, M., (2020). Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 277(124109), 182-198.
- [22] Miklečić, J., Lončarić, A., Veselić, N. & Jirous-Rajković, V. (2022). Influence of wood surface preparation on roughness, wettability and coating adhesion of unmodified and thermally modified wood. *Journal of Drvna industrija*, 65(4), 83-98.