

(OPEN ACCESS)

Investigation of the toxic effect of carbazide, aminopropyltriethoxysilane (APTES) on the formaldehyde gas emission rate and physical-mechanical properties of particleboard made with urea-formaldehyde (UF) resin

Samaneh Pourkarami^{*1}, Hamid Reza Mansouri²,
Mohammad Dehmardeh Qalenow³, Ali Reza Samzadeh⁴

1. Corresponding Author, Ph.D. Student in Wood and Cellulosic Products Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: s.pourkarami64@yahoo.com
2. Associate Prof., Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: hamidreza.mansouri@gmail.com
3. Associate Prof., Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: mmdahmardeh@uoz.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Chemistry, Faculty of Science, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: arsamzadeh@uoz.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 11.17.2025
Revised: 01.03.2026
Accepted: 01.21.2026

Keywords:
Carbazide poisoning,
Formaldehyde gas
emissions,
Samed glue,
Shiraz glue

ABSTRACT

Background and Objectives: The particleboard industry plays a significant role in construction and interior decoration, with urea-formaldehyde (UF) adhesives widely employed due to their cost-effectiveness. However, formaldehyde emissions from UF-bonded particleboards pose serious environmental and health concerns, including respiratory irritation and potential carcinogenic effects. Recent research has focused on incorporating formaldehyde-scavenging additives, such as semicarbazide and aminopropyltriethoxysilane (APTES), to mitigate emissions from finished products. This study investigates the effects of semi-carbazide and APTES on formaldehyde emission rates and the physical, mechanical properties of particleboards manufactured using UF resins produced by Shiraz and Samed Adhesives Companies.

Materials and Methods: Particleboards were fabricated using a blend of coarse and fine wood chips (60:40 ratio), UF adhesives from Shiraz and Samed Mashhad companies, a hardener, and varying concentrations of additives: semi-carbazide (1.0 and 1.5 g per kg of dry wood) and APTES (2%, 4%, and 6% by weight of adhesive solids). The dried wood chips were thoroughly mixed with the adhesive system and additives, then hot-pressed at 190 °C under controlled pressure to produce boards with a target density of 0.70 g/cm³ and thickness of 16 mm. After a two-week conditioning period under standard climate conditions (20 °C, 65% relative humidity), the boards were evaluated for modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bond strength (IB), formaldehyde emission (per EN 717-3), water absorption (2 h and 24 h), thickness swelling (2 h and 24 h), and microstructural characteristics using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR).

Results: Particleboards bonded with Shiraz UF resin generally exhibited superior mechanical performance compared to those using Samed Mashhad resin, demonstrating higher MOR, MOE, and IB values in control specimens. Among Shiraz resin formulations, the addition of 1.0 g/kg semi-carbazide yielded the highest MOR, while 1.5 g/kg provided the greatest IB and MOE. For APTES-modified Shiraz resin, a 2% concentration produced optimal MOR, IB, and MOE. Shiraz-based boards also showed the lowest water absorption and thickness swelling after both 2 h and 24 h immersion, with the exception of 2 h water absorption, where Samed Mashhad resin with 6% APTES performed best. After 24 h, however, Shiraz resin with 6% APTES exhibited the lowest water uptake. Formaldehyde emissions were consistently lower in Shiraz resin boards, with the most significant reductions observed at 1.5 g/kg semi-carbazide and 2% APTES. SEM micrographs revealed enhanced interfacial adhesion and structural homogeneity in APTES-modified boards, while FTIR spectra confirmed the formation of robust chemical bonds, including C=O, N-H, C-H, and Si-O-Si groups, between the adhesive matrix and wood particles, explaining the improved performance.

Conclusion: The optimal mechanical properties, specifically the highest MOR and IB, were achieved with Shiraz UF resin modified with 2% APTES, whereas the control Shiraz formulation yielded the highest MOE. Regarding dimensional stability, the lowest 2 h water absorption occurred in Samed Mashhad resin with 6% APTES, while the lowest 24 h water absorption and thickness swelling were observed in Shiraz resin with 6% and 2% APTES, respectively. For emission safety, Samed Mashhad resin with 6% APTES exhibited the lowest formaldehyde release. Microstructural analyses (SEM and FTIR) corroborated these findings, demonstrating that APTES promotes superior interfacial bonding and chemical compatibility between the adhesive and wood substrate through silane-mediated crosslinking.

Cite this article: Pourkarami, Samaneh, Mansouri, Hamid Reza, Dehmardeh Qalenow, Mohammad, Samzadeh, Ali Reza. 2026. Investigation of the toxic effect of carbazide, aminopropyltriethoxysilane (APTES) on the formaldehyde gas emission rate and physical-mechanical properties of particleboard made with urea-formaldehyde (UF) resin. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (4), 109-128.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2026.24289.2136

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی تأثیر سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) بر میزان انتشار گاز فرمالدئید و خواص فیزیکی - مکانیکی تخته‌خرده‌چوب‌های ساخته‌شده با رزین اوره فرمالدئید (UF)

سمانه پورکرمی^{۱*}، حمیدرضا منصور^۲، محمد دهمرده قلعه‌نو^۳، علی‌رضا سامزاده^۴

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: s.pourkarami64@yahoo.com
۲. دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: hamidreza.mansouri@gmail.com
۳. دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mmdahmardeh@uoz.ac.ir
۴. دانشیار گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: arsamzadeh@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: صنعت تخته‌خرده‌چوب به دلیل کاربرد گسترده در ساخت‌وساز و دکوراسیون دارای اهمیت است که در آن چسب‌های اوره فرمالدئید به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن، به‌طور رایج استفاده می‌شوند؛ بااین‌حال، انتشار گاز اوره فرمالدئید از این تخته‌ها یک چالش جدی زیست‌محیطی و بهداشتی محسوب می‌شود که می‌تواند منجر به خطرات در سلامتی و حتی سرطان شود؛ بنابراین، پژوهش‌های کنونی بر روی استفاده از افزودنی‌هایی مانند سمی کاربازید و آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان متمرکز شده‌اند تا این میزان انتشار فرمالدئید از محصولات نهایی کاهش یابد. هدف بررسی تأثیر سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) بر میزان انتشار گاز فرمالدئید و خواص فیزیکی - مکانیکی تخته‌خرده‌چوب‌های ساخته‌شده با رزین اوره فرمالدئید (UF) تولیدی شرکت‌های چسب شیراز و سامد می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱	
واژه‌های کلیدی: انتشار گاز فرمالدئید، چسب سامد، چسب شیراز، سمی کاربازید	مواد و روش‌ها: این پژوهش به بررسی ساخت تخته‌خرده‌چوب‌های با استفاده از خرده‌چوب‌های درشت و ریز، چسب اوره فرمالدئید سامد مشهد، شیراز، هاردنر و مقادیر مختلفی از ماده سمی کاربازید (۱، ۱/۵ گرم) و آمینو پروپیل تری اتوکسید (۲، ۴، ۶ درصد) می‌پردازد؛ خرده‌چوب‌های خشک‌شده با این مواد مخلوط شده و یک خرده‌چوب (با نسبت ۶۰ به ۴۰ خرده‌چوب درشت به ریز) در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و فشار مشخص پرس شد تا تخته‌هایی با دانسیته ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ضخامت ۱۶ میلی‌متر تولید شود؛ در نهایت، تخته ساخته‌شده به مدت دو هفته در شرایط استاندارد نگهداری شدند و برای ارزیابی کیفیت،

مقاومت و مدول خمشی، چسبندگی داخلی، انتشار فرمالدئید، جذب آب، واکنشیدگی ضخامت و بررسی‌های میکروسکوپی روی آن‌ها انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که چسب شاهد شیراز عملکرد مکانیکی بهتری دارد، از جمله می‌توان به مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی و مدول الاستیسیته خمشی بالاتر آن اشاره کرد. سمی‌کربازید در چسب شیراز با ۱ گرم بیش‌ترین مقاومت خمشی و با ۱/۵ گرم بالاترین چسبندگی داخلی و مدول خمشی و آمینوپروپیل‌تری‌اتوکسی‌سیلان در چسب شیراز با ۲ درصد بیش‌ترین مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی و مدول خمشی نشان دادند. کم‌ترین جذب آب و واکنشیدگی ضخامت (۲ و ۲۴ ساعت) در چسب شیراز مشاهده شد. در مورد جذب آب پس از ۲ ساعت، چسب سامد مشهد با ۶ درصد آمینوپروپیل‌تری‌اتوکسی‌سیلان کم‌ترین جذب آب را داشت، اما پس از ۲۴ ساعت، چسب شیراز با همان غلظت ۶ درصد کم‌ترین میزان جذب آب را نشان داد. انتشار فرمالدئید در چسب شیراز به‌طور کلی کم‌تر بود و با افزودن ۱/۵ گرم سمی‌کربازید و هم‌چنین ۲ درصد تری‌اتوکسید، کاهش چشمگیری در چسب شیراز مشاهده شد. تحلیل‌های SEM و FTIR این نتایج را تأیید کرده و نشان دادند که پیوندهای شیمیایی قوی (شامل گروه‌های C=O, N-H, C-H و Si-O-Si) بین اجزا، منجر به افزایش چسبندگی، یکپارچگی و سازگاری بین پلیمر چسب و خرده‌چوب شده است.

نتیجه‌گیری: بهترین خواص مکانیکی (بیش‌ترین مقاومت خمشی و چسبندگی داخلی) با استفاده از چسب شیراز همراه با ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان به‌دست آمد، درحالی‌که بالاترین مدول الاستیسیته خمشی مربوط به چسب شاهد شیراز بود؛ در زمینه جذب آب، کم‌ترین مقدار در ۲ ساعت مربوط به چسب سامد مشهد با ۶ درصد افزودنی و در ۲۴ ساعت مربوط به چسب شیراز با ۶ درصد افزودنی بود و کم‌ترین واکنشیدگی ضخامت نیز در چسب شیراز با ۲ درصد تری‌اتوکسید مشاهده شد؛ از نظر ایمنی، کم‌ترین انتشار گاز فرمالدئید متعلق به چسب سامد مشهد با ۶ درصد تری‌اتوکسید بود؛ علاوه‌بر این، بررسی‌های میکروسکوپی (SEM) نشان داد که افزودن سیلان باعث بهبود چسبندگی و یکنواختی ساختار شده و تحلیل FTIR نیز بر برقراری تعاملات شیمیایی مؤثر بین اجزای چسب و خرده‌چوب تأیید داشت.

استناد: پورکرمی، سمانه، منصوری، حمیدرضا، دهمرده قلعه‌نو، محمد، سام‌زاده، علی‌رضا (۱۴۰۴). بررسی تأثیر سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) بر میزان انتشار گاز فرمالدئید و خواص فیزیکی - مکانیکی تخته‌خرده‌چوب‌های ساخته‌شده با رزین اوره فرمالدئید (UF). نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۲ (۴)، ۱۲۸-۱۰۹.

DOI: 10.22069/jwfst.2026.24289.2136



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

افزایش سریع جمعیت جهان، تعامل بین انسان و طبیعت را افزایش داده است. این وضعیت تقاضا برای محصولات جنگلی، به ویژه تخته کامپوزیت‌های چوبی مقرون به صرفه مانند تخته خرده چوب را افزایش داده است (۱). در تولید تخته خرده چوب، چسب اوره فرمالدئید (UF) به دلیل قیمت پایین، خواص تکنولوژیکی خوب، عدم وجود رنگ در پلیمر پخت و سهولت کاربرد برای انواع شرایط پخت از مزایای اوره فرمالدئید است، در حالی که انتشار فرمالدئید و مقاومت ضعیف در برابر آب از معایب اصلی آن می باشد (۲). طبق آمار، مقدار چسب رزین اوره فرمالدئید ۹۱ درصد از چسب‌های پانل‌های چوبی را تشکیل می دهد. با این حال، تخته‌های ساخته شده با UF مشکل انتشار فرمالدئید آزاد دارند که تهدیدی جدی برای سلامتی افراد است (۳). انتشار فرمالدئید یکی از ویژگی‌های مهمی است که باید در هنگام خرید

پانل‌های چوبی برای مصارف خانگی در نظر گرفت، چرا که فرمالدئید اثر مضر شناخته شده‌ای بر سلامت انسان دارد (۴).

با توجه به ماهیت خطرناک فرمالدئید، تولیدکنندگان چسب‌های مبتنی بر فرمالدئید و پانل‌های چوبی به طور مداوم در جستجوی راهی برای کاهش این انتشار هستند (۵). استفاده از افزودنی‌های شیمیایی به نام جذب کننده‌های فرمالدئید است. متداول ترین مواد پاک کننده ترکیبات حاوی آمین مانند اوره، آمونیاک، ملامین و دی سیانیدی امید هستند. همان گونه که در رابطه ۱ ملامین با فرمالدئید واکنش داده و متیلول ملامین را تشکیل می دهد، دی سیان دی امید نیز مطابق با رابطه ۲ با دو مول فرمالدئید واکنش کرده و منجر به تشکیل متیلول دی سیان آمیدها می گردد (۶).



دوستدار محیط زیست و الیاف پسماند ریشه شیرین بیان پرداختند. نتایج نشان داد اگر الیاف پسماند ریشه شیرین بیان با الیاف کارخانه ترکیب شود و چسب اوره فرمالدئید با تثبیت کننده‌های سنتی نوع اول (عصاره میوه بلوط، کات کبود، صمغ بادام کوهی) و نوع دوم (عصاره برگ گردو، آلوم، صمغ کتیرا) اصلاح شود، مقدار انتشار گاز فرمالدئید به میزان بیش از ۵۰ درصد کاهش می یابد (۷).

در پژوهشی آصفی هدایت آباد و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی کاهش انتشار گاز فرمالدئید از تخته‌های ساخته شده با رزین اوره فرمالدئید با استفاده از افزودنی اوره پرداختند. نتایج نشان داد کاهش رزین

عصاره‌های گیاهی (عصاره جفت بلوط و برگ گردو) و صمغ‌های گیاهی به دلیل داشتن ترکیبات فنولی، گروه‌های فراوان فالونوئید، دوست دار محیط زیست، سمی نبودن، تجدید پذیر بودن و در دسترس بودن. مناسب ترین مواد جهت کاهش انتشار اوره فرمالدئید به شمار می روند. در این مطالعه، عصاره‌های گیاهی میوه بلوط و برگ گردو و به عنوان جاذب فرمالدئید برای کاهش انتشار فرمالدئید از تخته‌های فیبر با دانسیته متوسط تولید شده با رزین اوره فرمالدئید ارزیابی شد (۷). در پژوهشی کمشکی و همکاران (۱۴۰۲) به ارزیابی انتشار فرمالدئید تخته فیبرهای دانسیته متوسط ساخته شده با مواد تثبیت کننده

سامد مشهد و شیراز از چسب‌های اوره فرمالدئید رایج در ایران می‌باشد. انتخاب سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسید بر اساس ارزیابی جامع نسبت کارایی به هزینه صورت پذیرفت. این ماده، در مقایسه با سایر مشتقات آمینی با قابلیت عملکردی مشابه، اقتصادی‌ترین گزینه در مقیاس آزمایشگاهی بود، بنابراین با تضمین حفظ بالاترین کیفیت نتایج، ما را قادر ساخت تا به نقطه بهینه اقتصادی-آزمایشی دست یابیم.

مواد و روش‌ها

مواد: در این پژوهش استفاده از چسب اوره فرمالدئید از دو شرکت سامد مشهد و شیراز به دلیل انتخاب این نوع چسب، مقاومت مکانیکی بالا، قدرت چسبندگی مناسب به بافت چوب، پایداری حرارتی قابل قبول و قیمت اقتصادی آن در مقایسه با سایر رزین‌های ترموست می‌باشد. هم‌چنین برندهای سامد و شیراز به دلیل کیفیت ثابت، خلوص مناسب رزین، دسترسی آسان در بازار داخلی و تجربه موفق قبلی در صنایع چوب، تخته‌سازی انتخاب و مقایسه چسب اوره فرمالدئید از دو شرکت که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ می‌باشد خرده‌چوب‌های درشت و ریز از شرکت نئوپان گرگان تهیه و به آزمایشگاه دانشگاه زابل منتقل شد هم‌چنین هاردنر از شرکت ROMIL خریداری و ماده سمی کاربازید کلراید شرکت سازنده مرک آلمان با مشخصات $M=111/53 \text{ g/mol}$ ، ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان شرکت سازنده سیگما الدریج با مشخصات $M=221/37 \text{ g/mol}$ ، تهیه و مورد استفاده قرار گرفت.

اوره فرمالدئید، سبب کاهش انتشار فرمالدئید از تخته‌خرده‌چوب می‌شود. مقدار درصد افزودنی اوره در تخته‌خرده‌چوب بر کاهش انتشار فرمالدئید از تخته معنی‌دار است و سبب کاهش انتشار فرمالدئید می‌شود. هم‌چنین مقاومت چسبندگی داخلی (بیش‌تر از حد استاندارد) با افزودن پودر اوره به چسب افزایش یافت. وجود اوره در سطح خرده‌چوب‌ها، مانع ایجاد اتصالات خوب بین چسب و خرده‌چوب‌ها می‌شود (۸). هم‌چنین غنی و همکاران (۲۰۱۸) کاهش انتشار فرمالدئید تخته‌خرده‌چوب با پیوند اوره فرمالدئید با افزودن آمین‌ها به‌عنوان جاذب فرمالدئید پرداختند. به این نتیجه رسیدن که رزین UF حاوی آمین کاملاً پخته‌شده دارای ثبات حرارتی بالاتری نسبت به رزین UF است. رزین UF حاوی آمین نیز به دلیل pH بالاتر، زمان ژل شدن طولانی‌تری داشت. با این وجود، هر دو ویژگی فیزیکی و مکانیکی تخته‌خرده‌چوب حاصل تأثیر منفی گذاشت. تخته‌خرده‌چوب ساخته شده از رزین UF حاوی آمین دارای واکنشیدگی ضخامت و جذب آب بالاتری بود. علاوه بر این، استحکام خمشی کم‌تر و استحکام داخلی نیز ثبت شد (۹).

استفاده کم‌تر چسب روی خرده‌چوب از یک طرف باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود اما از طرف دیگر خواص مکانیکی تخته‌ها را کاهش می‌دهد. به همین دلیل برای کاهش انتشار فرمالدئید می‌توان از مواد افزودنی استفاده کرد. هدف از این پژوهش تأثیر افزودنی‌های سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسید بر خواص فیزیکی-مکانیکی و انتشار گاز فرمالدئید در تخته‌خرده‌چوب‌های تولیدی شرکت‌های چسب شیراز و سامد می‌باشد. چسب

جدول ۱- مشخصات چسب اوره فرمالدئید.

Table 1. Urea formaldehyde adhesive specifications.

ژل تایم (S) Gel time (S)	pH	گرانروی CP Viscosity CP	ماده جامد (%) Solid (%)	نوع Type	شرکت سازنده Manufacturer
50-70	7.5-8.5	50-90	50-70	مایع Liquid	چسب شیراز Shiraz glue
50-65	7.5	70-200	50-60	پودر Powder	چسب سامد Samed Glue Mashhad

و واکنشیدگی ضخامت مطابق با استاندارد EN317 ابعاد نمونه ۱۶×۵۰×۵۰ میلی متر برش داده شد.

برای جذب فرمالدئید آزاد شده از تخته‌ها، نمونه‌هایی از دسیکاتور به حجم تقریبی ۱۰ لیتر و نمونه‌ها روی صفحه مشبک، بالای ظرف شیشه‌ای حاوی ۳۰۰ میلی لیتر آب مقطر قرار گرفتند. قبل از بستن سرپوش دسیکاتور به منظور اطمینان از عدم نفوذ هوا، لبه دسیکاتور و سرپوش آن با لایه نازکی از پارافین آغشته شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت، ظرف حاوی آب مقطر خارج و به عنوان محلول نمونه استفاده قرار گرفت. در ادامه برای تعیین جذب محلول نمونه در طول موج ۴۱۲ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، ۲۵ میلی لیتر محلول نمونه با ۲۵ میلی لیتر محلول استیل استون- استات آمونیوم درون بالن ۱۰۰ میلی لیتری ریخته، محلول حاصل در حمام آب با دمای 65 ± 2 درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفت. سپس بعد از ۶۰ دقیقه، جذب محلول توسط اسپکتروفتومتر به دست آمد.

اندازه‌گیری خواص مکانیکی، فیزیکی و انتشار گاز فرمالدئید از تخته خرده چوب: مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی مطابق با استاندارد EN310 و چسبندگی داخلی (IB) مطابق با استاندارد EN 319 به وسیله دستگاه HOUNS با مدل H 25 KS واقع در دانشگاه زابل استفاده شد. هم‌چنین جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت مطابق با استاندارد

روش کار: خرده‌چوب‌ها با چسب اوره فرمالدئید با غلظت ۵۰ درصد و ۱۰ درصد وزن خشک خرده‌چوب، هم‌چنین ماده افزودنی شیمیایی آمین دار سمی کاربازید (۱ و ۱/۵ گرم وزن خشک چسب) و آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (۲، ۴، ۶ درصد) به دو نوع چسب کارخانه‌های سامد مشهد و شیراز اضافه شد و با استفاده از دستگاه چسب زن آزمایشگاهی مخلوط گردید. سپس یک خرده‌چوب به صورت سه لایه با نسبت ۶۰ به ۴۰ خرده‌چوب‌های درشت و نرمه توسط یک قالب به ابعاد ۴۵۰×۴۵۰ میلی متر به صورت دستی تشکیل و با استفاده از پرس هیدرولیک آزمایشگاهی مدل RANJBAR-SWP در شرایط ثابت پرس دمای ۱۹۰ درجه سانتی گراد، فشار ۳۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و در زمان ۵ دقیقه پرس و در نهایت تخته‌ای با دانسته ۰/۷ گرم بر سانتی مترمکعب و ضخامت ۱۶ میلی متر ساخته شدند؛ و برای هر تیمار ۳ تکرار در نظر گرفته شد. تخته‌ها بعد از ساخت به منظور متعادل سازی رطوبت و کاهش تنش‌های داخلی به مدت دو هفته در شرایط کلیما با دمای 20 ± 2 درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد قرار گرفت. برای آزمون مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه مطابق با استاندارد EN310 به ابعاد ۴۰×۷/۵ و برای آزمون جذب فرمالدئید مطابق با استاندارد ISO 12460-4 نمونه به ابعاد ۱۶×۵۰×۱۵ میلی متر هم‌چنین برای نمونه جذب آب

تخته‌خرده‌چوب مطابق با استاندارد ISO 12460-4 نمونه‌ها را در داخل در داخل دسیکاتور اندازه‌گیری و مقدار فرمالدئید آزاد به‌وسیله رابطه ۵ محاسبه گردید.

$$WA_{(t)} = \frac{W_{(t)} - W_{(o)}}{W_{(o)}} \times 100 \quad (۳)$$

موردنظر (gr)؛ W(o) وزن خشک نمونه قبل از غوطه‌وری (gr).

$$TS_{(t)} = \frac{T_{(t)} - T_{(o)}}{T_{(o)}} \times 100 \quad (۴)$$

غوطه‌وری موردنظر (mm)؛ T(o) ضخامت اولیه نمونه‌ها (mm).

$$\text{Free Formaldehyde (\%)} = (V_1 - V_2) \times M \times 3.002 / W \quad (۵)$$

میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن بررسی گردید.

نتایج و بحث

جدول ۲ مقدار F و تجزیه واریانس اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد و اثر متغیر مورد بررسی و ویژگی‌های مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی، مدول الاستیسیته خمش و جذب آب، واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت تخته‌خرده‌چوب ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

EN317 انجام و در نهایت نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیله رابطه ۳ جذب آب و رابطه ۴ واکنشیدگی ضخامت محاسبه شد. برای اندازه‌گیری مقدار انتشار فرمالدئید

که در آن، WA(t) مقدار جذب آب در زمان غوطه‌وری (٪)؛ W(t) وزن نمونه در زمان غوطه‌وری

که در آن، TS(t) واکنشیدگی ضخامت در زمان غوطه‌وری (٪)؛ T(t) ضخامت نمونه در زمان

که در آن، V₁ حجم ۰/۱ مولار محلول NaOH برای رزین (میلی‌لیتر)؛ V₂ حجم ۰/۱ مولار محلول NaOH برای بلانک (میلی‌لیتر)؛ M مولاریته محلول NaOH؛ W وزن رزین (گرم) (۱۰).

میکروسکوپ الکترونی پویشی: تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از نمونه شکست مقاومت خمشی با اندازه ابعاد ۱×۱×۱ سانتی‌متر برش داده و با دستگاه SEM مدل VEGA در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تصاویر تهیه شد.

آنالیز آماری: داده‌های حاصل از آزمون‌ها با نرم‌افزار SPSS با سطح اطمینان ۹۵ درصد و اختلاف

جدول ۲- مقدار F و اختلاف معنی‌داری مقاومت مکانیکی و فیزیکی تخته‌خرده‌چوب.

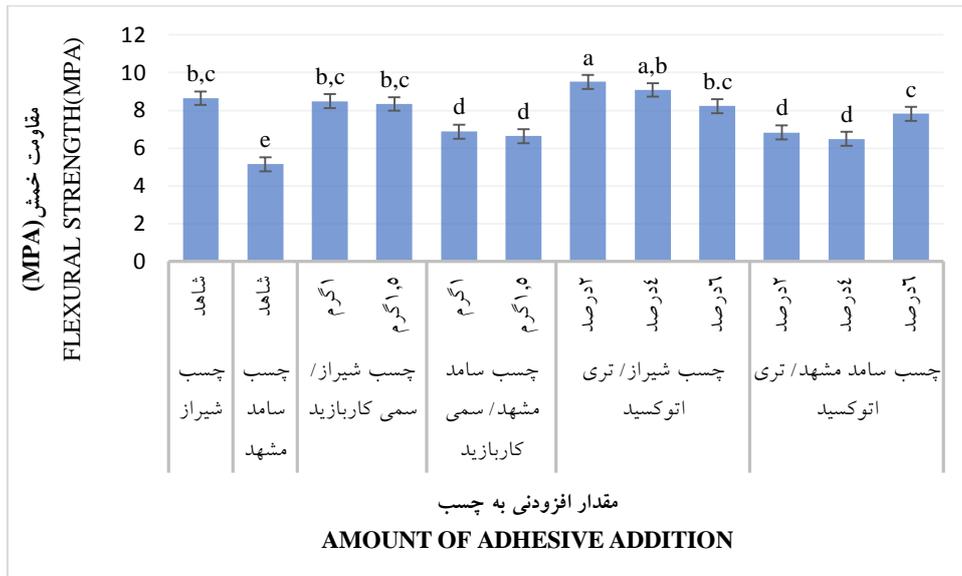
Table 2. F value and significant difference in mechanical and physical strength of particleboard.

مقاومت خمشی	مدول الاستیسیته خمش	چسبندگی داخلی	جذب آب ۲ ساعت	جذب آب ۲۴ ساعت	واکنشیدگی ضخامت ۲ ساعت	واکنشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت
Flexural strength	Flexural modulus of elasticity	Internal adhesion	Water absorption 2 hours	Water absorption 24 hours	Thickness 2 hours	Thickness 24 hours
20.867*	4.037*	2.852*	12.314*	30.891*	23.786*	28.758*

معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد (*)، غیرمعنی‌داری (ns)

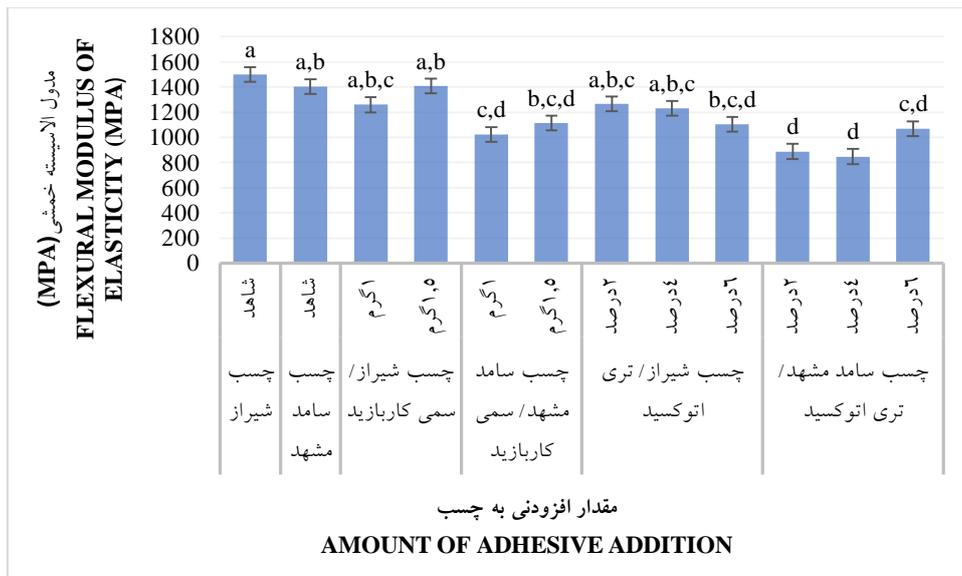
چسبندگی داخلی در چسب شیراز، ۲ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان و در مدول الاستیسیته خمشی چسب شاهد شیراز ۱۴۹۸/۳۷۳۳ مگاپاسگال مشاهده شد. آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی و فیزیکی تخته خرده چوب ساخته شده با رزین اوره فرمالدئید (UF) تأثیر می گذارد که عمدتاً از طریق نقش آن به عنوان عامل اتصال دهنده و جاذب فرمالدئید است. افزودن APTES به رزین های UF برای تولید تخته خرده چوب به دلیل نیاز به افزایش عملکرد چسب و کاهش انتشار فرمالدئید، یک نگرانی مهم زیست محیطی و بهداشتی، صورت می گیرد. APTES به عنوان یک عامل اتصال سیلان عمل می کند و دارای عملکرد دوگانه ای است که به آن اجازه می دهد با رزین آلی و اجزای چوب معدنی تعامل داشته باشد. گروه آمینوی آلی - عاملی آن (-NH₂) می تواند با رزین آلی UF واکنش دهد، در حالی که گروه اتوکسی سیلان آن (-Si(OEt)₃) می تواند به گروه های سیلانول (-SiOH) هیدرولیز شود و سپس با گروه های هیدروکسیل روی سطح چوب متراکم شود و پیوندهای کووالانسی قوی (Si-O-wood) تشکیل دهد (۱۲). پیوند بین سطحی افزایش یافته ایجاد شده توسط APTES بین ذرات چوب و رزین UF، راندمان انتقال تنش در کامپوزیت را بهبود می بخشد و منجر به افزایش استحکام می شود.

مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی و مدول الاستیسیته خمشی: همان طور که در جدول ۲ مشاهده می گردد نتایج حاصل از تجزیه واریانس بر ویژگی های مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی، مدول الاستیسیته خمشی در سطح ۹۵ درصد معنی دار بوده است. همان طور که در شکل های ۱، ۲ و ۳ مشاهده می شود چسب شاهد شیراز مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی، مدول الاستیسیته خمشی به ترتیب ۶۷/۹۶، ۶۶/۷۸، ۶/۷۶ درصد بیش تر نسبت به چسب شاهد سامد مشهد دارد (۱۰). با افزودن ماده سمی کاربازید به چسب شیراز و چسب سامد بیش ترین مقاومت خمشی در چسب شیراز، ۱ گرم سمی کاربازید، بیش ترین مقاومت چسبندگی داخلی، مدول الاستیسیته خمشی چسب شیراز، ۱/۵ گرم ماده سمی کاربازید را دارد. به طور کلی ترکیب های شیمیایی برای افزایش پیوند عرضی و تقویت شبکه پلیمری، یک استراتژی شناخته شده برای بهبود استحکام خمشی، چسبندگی داخلی و مدول الاستیسیته خمشی در رزین های UF است (۱۱). اضافه کردن ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان به چسب سامد مشهد و شیراز بیش ترین مدول الاستیسیته خمشی، مقاومت چسبندگی داخلی، خمشی در چسب شیراز، ۲ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان می باشد؛ اما در مجموع با توجه به مطالب مطرح شده افزودن سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان، در چسب سامد مشهد و شیراز ۹/۸۲ درصد بیش ترین مقاومت خمشی، ۱۶۹/۷۸ درصد بیش ترین



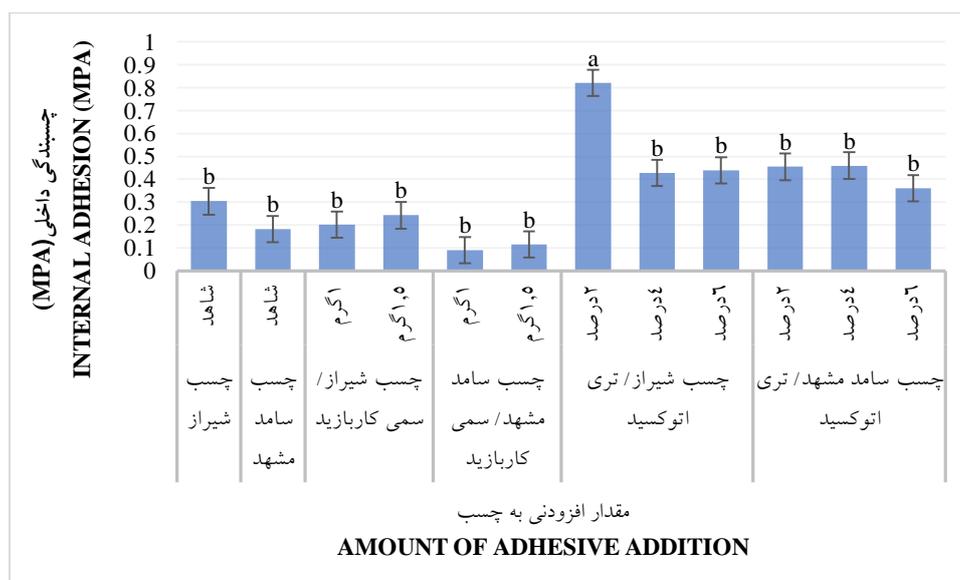
شکل ۱- مقاومت خمشی تخته‌خرده‌چوب.

Figure 1. Flexural strength of particleboard.



شکل ۲- مدول الاستیسیته خمشی تخته‌خرده‌چوب.

Figure 2. Flexural elastic modulus of particleboard.



شکل ۳- مقاومت چسبندگی داخلی تخته خرده چوب.

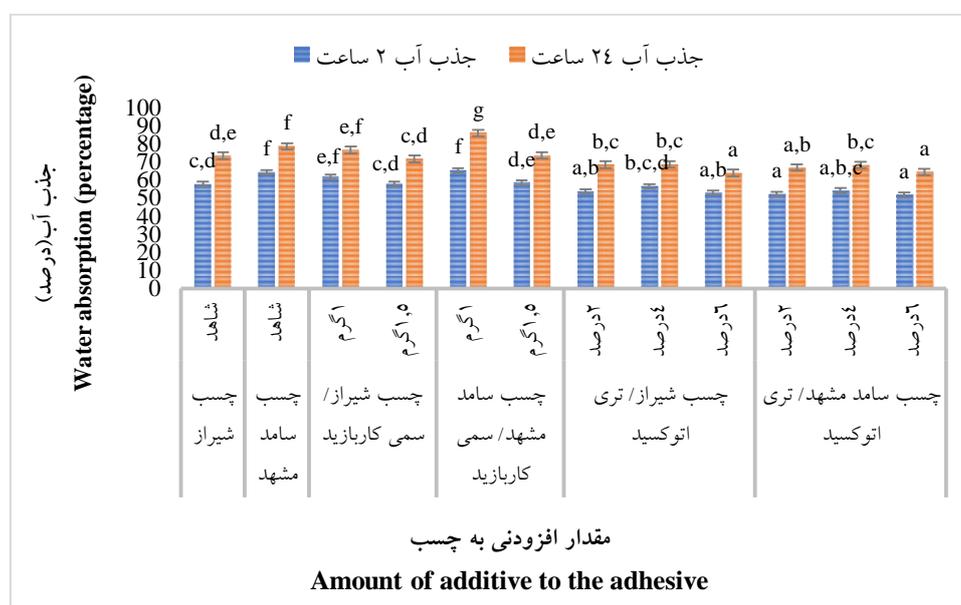
Figure 3. Internal adhesion strength of particleboard.

شبکه پلیمری و بهبود مقاومت در برابر آب، منجر به کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در تخته خرده چوب شود (۱۳). هم چنین اضافه کردن ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان به چسب سامد مشهد و شیراز کمترین واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت چسب شیراز و ۲ درصد ماده است در جذب آب ۲ ساعت چسب سامد مشهد، ۶ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان کمترین جذب آب ۲ ساعت داشت ولی با گذشت زمان در ۲۴ ساعت کمترین جذب آب چسب شیراز، ۶ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان می باشد؛ اما در مجموع با توجه به مطالب مطرح شده افزودن سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان، در چسب سامد مشهد و شیراز ۲۳/۷۸ درصد کمترین جذب آب ۲ ساعت چسب سامد مشهد، ۶ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان و ۱۴/۸۹ درصد کمترین جذب آب ۲۴ ساعت چسب شیراز، ۶ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسید، ۱۹/۳۹، ۱۹/۲۷ درصد به ترتیب کمترین واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت

جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت: همان طور که در جدول ۲ مشاهده می گردد نتایج حاصل از تجزیه واریانس بر ویژگی های جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت در سطح ۹۵ درصد معنی دار بوده است. همان طور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می شود چسب شیراز جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۱۱/۲۹، ۷، ۲۶/۹۵، ۱۷/۹۳ درصد کمتری نسبت به چسب سامد دارد (۱۰). با افزودن ماده سمی کاربازید به چسب سامد مشهد و شیراز کمترین جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت چسب شیراز و ۱/۵ گرم ماده سمی کار می باشد. احتمالاً سمی کاربازید اتصال عرضی چگالی و استحکام چسب را افزایش می دهد و یک مانع پایدارتر و کم تر نفوذپذیر در برابر مولکول های آب تشکیل می دهد. این شبکه تقویت شده، حرکت آب به داخل ساختار تخته خرده چوب را محدود می کند و در نتیجه هم جذب آب و هم واکنشیدگی ضخامت بعدی را که هنگام جذب آب توسط ذرات چوب رخ می دهد، کاهش می دهد. هم چنین افزایش

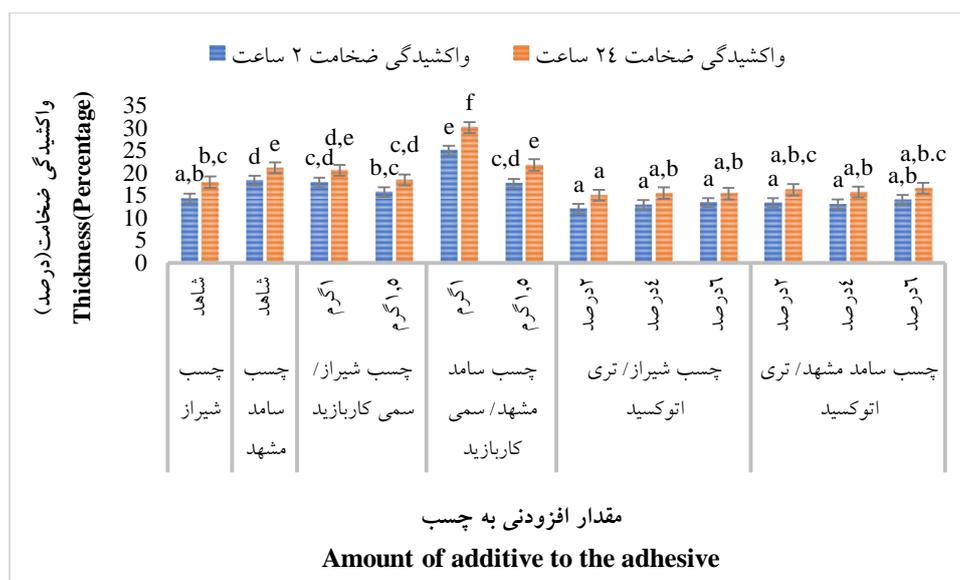
یک شبکه قوی‌تر و از نظر شیمیایی به هم پیوسته‌تر را در خود چسب و در سطح مشترک با الیاف چوب ایجاد می‌کند. این افزایش چگالی پیوند عرضی در ماتریس رزین، همان‌طور که توسط بینش‌های متخصصان پیشنهاد شده است، منجر به یک لایه چسب با نفوذپذیری کم‌تر می‌شود که کم‌تر مستعد جذب آب است. جذب آب یکی از عوامل اصلی بی‌ثباتی ابعادی در تخته‌خرده‌چوب است و با کاهش خاصیت رطوبت‌گیری چسب، جذب کلی آب توسط ماده کامپوزیت کاهش می‌یابد (۱۶، ۱۷ و ۱۸). ثانیاً، اعتقاد بر این است که شبکه سیلان تشکیل‌شده توسط تری‌اتوکسید در کاهش ریزحفره‌ها در ساختار تخته‌خرده‌چوب نقش دارد. ریزحفره‌ها و ساختارهای متخلخل مسیرهایی برای ورود آب هستند و کاهش آن‌ها مانع نفوذ آب به ذرات چوب و لایه‌های چسب می‌شود (۱۹).

چسب شیراز، ۲ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان مشاهده شد. فراتر از بهبودهای مکانیکی، APTES هم‌چنین بر خواص فیزیکی تخته‌خرده‌چوب، به‌ویژه پایداری ابعادی و مقاومت در برابر آب آن تأثیر مثبت می‌گذارد. کامپوزیت‌های پایه چوب به دلیل ماهیت رطوبت‌گریز چوب، مستعد تورم و جذب آب هستند. با تشکیل یک فاز میانی قوی‌تر و کم‌تر نفوذپذیر بین ذرات چوب و رزین، APTES می‌تواند جذب آب و واکنشیدگی ضخامت را کاهش دهد. بهبود پیوند عرضی و سازگاری بین چوب و رزین، نفوذ مولکول‌های آب به رابط چوب-رزین را کاهش می‌دهد و در نتیجه پدیده تورم را محدود می‌کند (۱۴). این امر برای دوام طولانی‌مدت و کاربرد تخته‌خرده‌چوب در محیط‌های مختلف بسیار مهم است (۱۵). مکانیسمی که تری‌اتوکسید از طریق آن واکنشیدگی را کاهش می‌دهد شامل چندین عامل است. اولاً، عوامل اتصال سیلان،



شکل ۴- جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت تخته‌خرده‌چوب.

Figure 4. Water absorption of 2 and 24 hours of particleboard.



شکل ۵- واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت تخته خرده چوب.

Figure 5. Thickness swelling 2 and 24 hours of particleboard.

تخته خرده چوب، انتشار گاز فرمالدئید کاهش می یابد (۸).

یکی از مکانیسم های اصلی که آمینو پروپیل تری اتوکسید سیلان از طریق آن انتشار فرمالدئید را کاهش می دهد، شامل واکنش گروه های عاملی آمین آن با فرمالدئید آزاد در رزین UF، به دام انداختن مؤثر آن و جلوگیری از انتشار آن در محیط زیست است (۲۰). بسیاری از افزودنی ها به عنوان جذب کننده های فرمالدئید عمل کرده و با مولکول های فرمالدئید آزاد که در غیر این صورت به محیط منتشر می شوند، واکنش نشان می دهند. این جاذب ها معمولاً حاوی گروه های عاملی هستند که می توانند با فرمالدئید ترکیبات پایدار تشکیل دهند. تری اتیلن تترامین با گروه های آمینه متعدد خود، به طور مؤثر فرمالدئید را جذب می کند و انتشار آن را از تخته سه لا هنگام ترکیب با رزین های UF کاهش می دهد. افزودنی ها می توانند راندمان پخت و میزان پیوند عرضی در ماتریس چسب را بهبود بخشند. یک شبکه پلیمری با پخت کامل تر و پیوند عرضی متراکم تر، فرمالدئید را به طور

انتشار گاز فرمالدئید: طبق جدول ۳ استفاده از چسب اوره فرمالدئید سامد مشهد، شیراز و برای کاهش انتشار گاز فرمالدئید از افزودن سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسید در تخته ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار است. گروه بندی دانکن مقادیر میانگین ها را در ۶ گروه قرار داد. شکل ۶ نشان داد که چسب شاهد شیراز انتشار فرمالدئید ۱۷/۷۵ درصد کم تری نسبت به چسب سامد مشهد دارد. با افزودن سمی کاربازید به چسب سامد مشهد و شیراز انتشار گاز فرمالدئید در چسب شیراز ۱/۵ گرم سمی کاربازید کم تر بوده هم چنین اضافه کردن آمینو پروپیل تری اتوکسید در چسب سامد مشهد و شیراز انتشار گاز فرمالدئید در چسب شیراز ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسید کم تر است؛ اما در مجموع با افزودن سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسید، در چسب سامد مشهد و شیراز ۲۳۱/۱ درصد کم ترین انتشار گاز فرمالدئید ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسید در چسب شیراز (۰/۷۴ میلی گرم بر لیتر) می باشد؛ که با کاهش مصرف چسب اوره فرمالدئید به

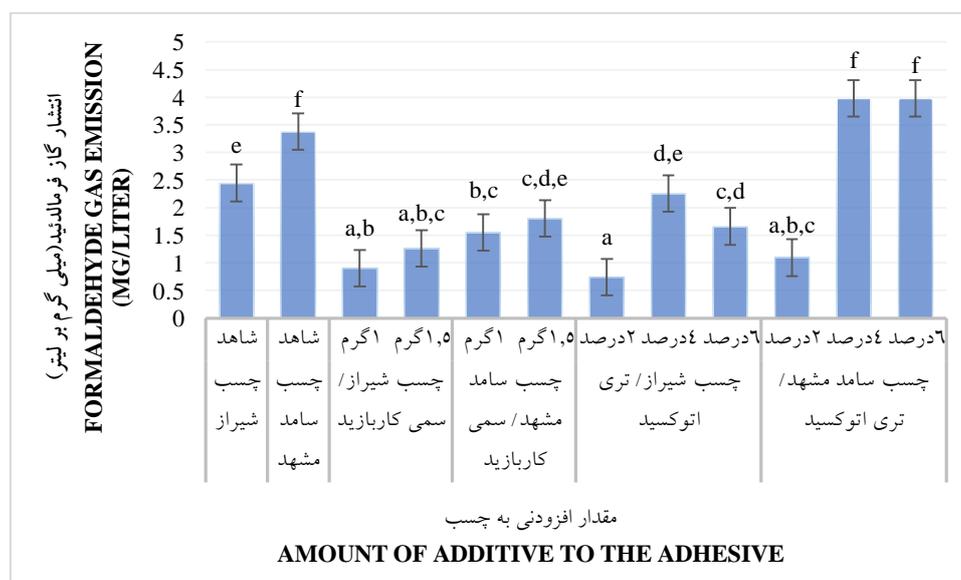
مؤثرتری به دام می‌اندازد و آزادسازی آن را کاهش می‌دهد. تری‌اتوکسید که به‌طور بالقوه به‌عنوان یک مونومر یا عامل پیوند عرضی عمل می‌کند، می‌تواند در ساختار رزین ادغام شود و در نتیجه خواص شیمیایی و فیزیکی آن را تغییر دهد تا تولید یا آزادسازی فرمالدئید را کاهش دهد (۲۱).

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر سمی کاربازید، آمینوپروپیل تری اتوکسید، بر انتشار گاز فرمالدئید در تخته‌خرده‌چوب.

Table 3. Analysis of variance of the toxic effect of carbazide, aminopropyltriethoxide, on formaldehyde gas emission in particleboard.

منبع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean square	F	سطح معنی‌داری Significance level
سمی کاربازید، تری اتوکسید Carbazid, triethoxide	4329.307	11	3.937	26.656	0.000*
خطا Total	3.545	24	0.148		
کل Error	204.074	36			

ضریب همبستگی: ۱/۰۰۰، ضریب اصلاحی: ۰/۹۹۹، * معنی‌دار در سطح ۵٪، ns عدم معنی‌داری



شکل ۶- انتشار گاز فرمالدئید تخته‌خرده‌چوب.

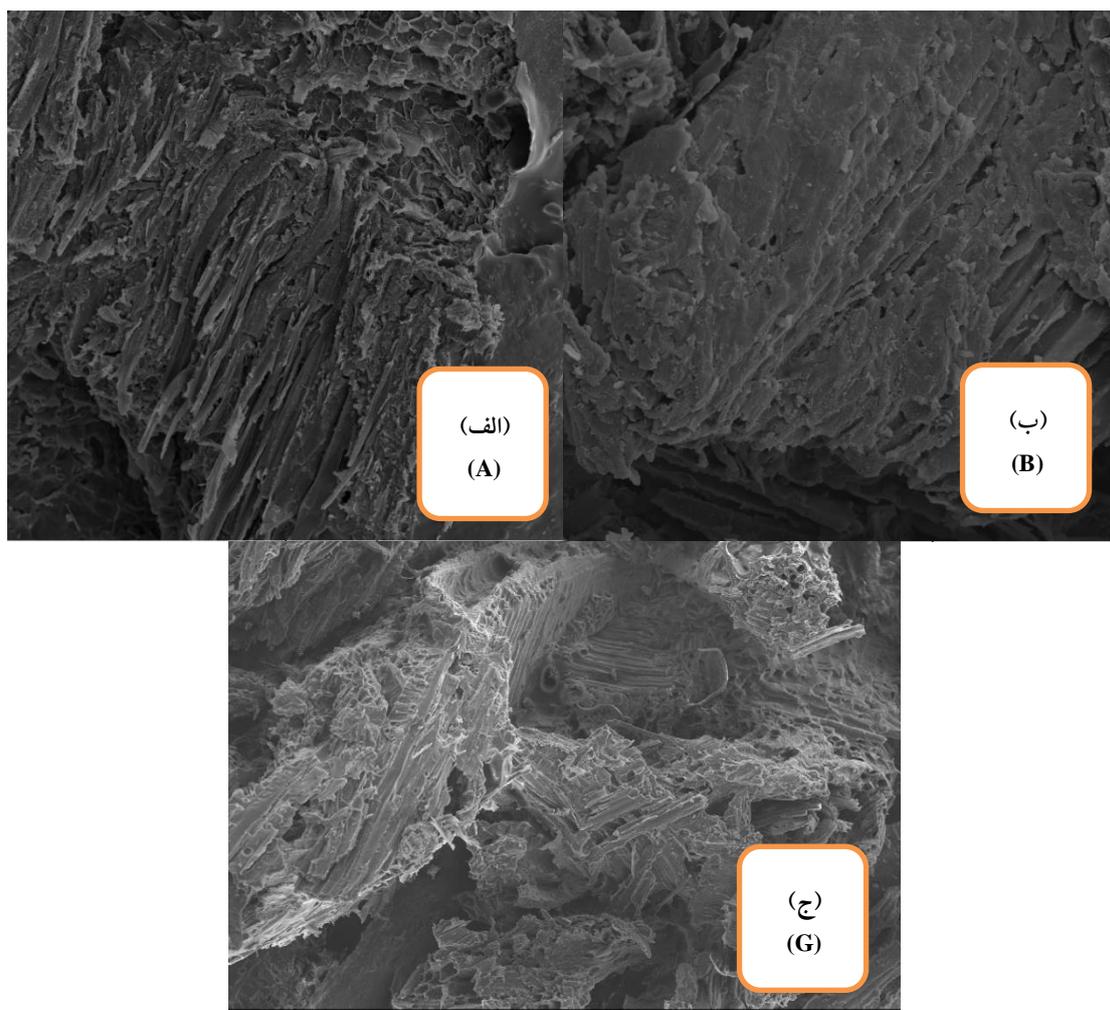
Figure 6. Formaldehyde gas emission of particleboard.

شکل (ب) نسبت به شکل (الف، ج) دارای سطح یکنواخت‌تر و صاف‌تر می‌باشد. هم‌چنین منافذ کم دیده می‌شود که موجب افزایش چسبندگی و سازگاری پلیمر بین خرده‌چوب و چسب ایجاد کاهش حفرات، یکنواخت بودن سطح است. که نشان‌دهنده

میکروسکوپ الکترونی پویشی: تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی تخته‌خرده‌چوب با چسب شیراز (الف)، چسب شیراز و ۲ درصد آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان (ب)، چسب شیراز با ۱ گرم سمی کاربازید (ج) در شکل ۷ نشان داده شده است.

خرده چوب، چسب، سمی کاربازید کم است. در شکل (ج) با اضافه کردن ۱ گرم سمی کاربازید به چسب شیراز موجب کاهش چسبندگی سازگاری پلیمر بین خرده چوب و چسب ایجاد حفرات، غیریکنواخت بودن سطح نسبت به شکل (الف و ب) می شود.

این است که اتصال و پیوند خوبی بین خرده چوب و چسب شیراز و ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان برقرار شده است در شکل (الف، ج) بیرون زدگی الیاف، حفرات بیش تری در تخته خرده چوب قابل مشاهده است که نشان دهنده این است که چسبندگی بین



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشی الف: تخته خرده چوب ساخته شده با چسب شیراز ب: تخته خرده چوب ساخته شده با چسب شیراز و ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان ج: تخته خرده چوب ساخته شده با چسب شیراز و ۱ گرم سمی کاربازید.

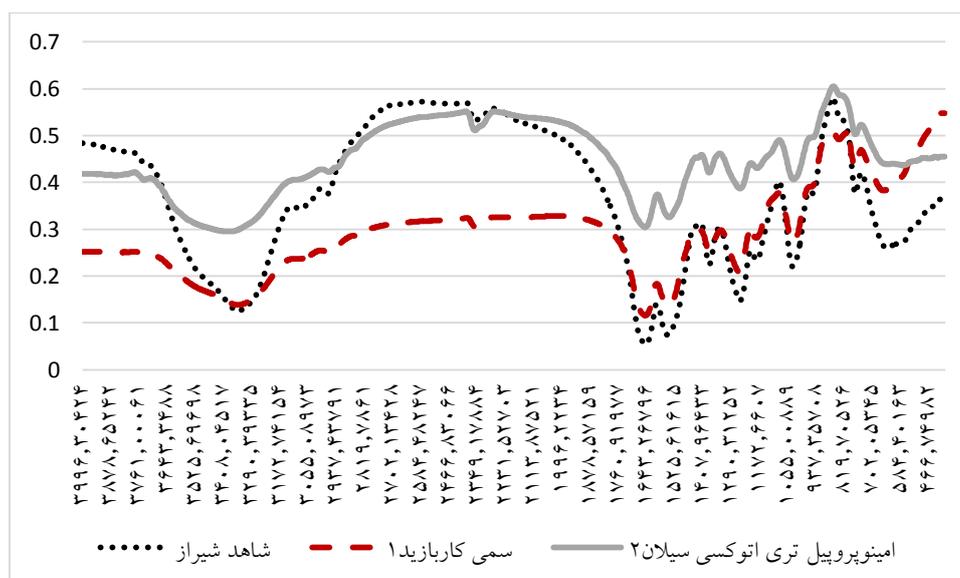
Figure 7. Scanning electron microscope images A: Particleboard made with Shiraz adhesive B: Particleboard made with Shiraz adhesive and 2% aminopropyltriethoxysilane C: Particleboard made with Shiraz adhesive and 1 gram of carbazide.

تری اتوکسی سیلان معمولاً شامل طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) برای شناسایی پیکهای مشخصه و گروه های عاملی است که

دستگاه طیف سنجی مادون قرمز (FTIR): تجزیه و تحلیل تخته خرده چوب متشکل از رزین اوره فرمالدئید (UF)، ذرات چوب، سمی کاربازید و آمینو پروپیل

هنگامی که کلرید سمی کاربازید اضافه می‌شود، یک بخش سمی کاربازید ($\text{H}_2\text{N-NH-CO-NH}_2$) ایجاد می‌کند که می‌تواند با فرمالدئید واکنش دهد. سمی کاربازید خود حاوی گروه‌های آمین نوع اول ($-\text{NH}_2$) و آمین نوع دوم ($-\text{NH}-$) و همچنین یک گروه کربونیل (C=O) است. واکنش‌ها با فرمالدئید می‌تواند منجر به تشکیل مشتقات متیلول روی گروه‌های آمین سمی کاربازید، مشابه اوره، شود (۲۷). این امر ارتعاشات کششی و خمشی N-H اضافی و همچنین کشش C=O را به ساختار نهایی پلیمر وارد می‌کند. به‌طور خاص، سمی کاربازید گروه‌های عاملی هیدرازید ($-\text{NH-NH}_2$) را معرفی می‌کند (۲۸). پیک‌های مشخصه چنین گروه‌هایی، به‌ویژه امتدادهای N-H ، در محدوده $3300-3200\text{ cm}^{-1}$ انتظار می‌رود که با امتدادهای N-H و O-H موجود از رزین UF همپوشانی بیشتری خواهد داشت (۲۹). همچنین با اضافه کردن آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان به چسب اوره فرمالدئید ارتعاشات کششی Si-O-Si که ناشی از تراکم گروه‌های سیلانول (Si-OH) پس از هیدرولیز گروه‌های اتوکسی (Si-OEt) است، معمولاً به‌صورت یک باند پهن و قوی بین 1000 تا 1100 cm^{-1} ظاهر می‌شوند (۳۰). ارتعاشات کششی Si-C اغلب در حدود 700 cm^{-1} یافت می‌شوند. گروه آمین نوع اول (NH_2) در آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان در ارتعاشات کششی N-H در ناحیه $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ و ارتعاشات خمشی N-H در حدود 1575 cm^{-1} و 1600 cm^{-1} نقش دارد (۳۱).

بیش‌هایی در مورد ساختار شیمیایی و پیوند درون ماده ارائه می‌دهد. این تکنیک برای درک برهمکنش‌های بین اجزای چوب و چسب UF و همچنین خواص کلی ماده کامپوزیت بسیار مهم است. اجزای چوب، به‌ویژه سلولز و همی‌سلولز، غنی از گروه‌های هیدروکسیل هستند (۲۲). این گروه‌ها معمولاً یک باند جذب پهن در ناحیه $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ تولید می‌کنند که مربوط به ارتعاشات کششی O-H است (۲۳). رزین اوره-فرمالدئید (UF)، چسب اصلی مورد استفاده در ساخت تخته خرده چوب، مجموعه‌ای از گروه‌های عاملی مشخصه و پیک‌های مربوطه را معرفی می‌کند (۲۴) گروه‌های آمید از اوره در ارتعاشات کششی N-H نقش دارند که اغلب با کشش O-H از چوب همپوشانی دارند و معمولاً در ناحیه $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ مشاهده می‌شوند؛ و ارتعاشات کششی C=O گروه کربونیل در پیوند آمیدی رزین اوره- فرمالدئید، یک باند جذب قوی در حدود 1650 cm^{-1} نشان می‌دهد (۲۵). این پیک اغلب برای تمایز UF از رزین‌های ملامین-فرمالدئید (MF) استفاده می‌شود، جایی که MF نیز پیکی در حدود 1650 cm^{-1} نشان می‌دهد (۲۶). در ارتعاشات کششی پیوند C-N از قسمت اوره رزین در ناحیه $1200-1350\text{ cm}^{-1}$ ظاهر می‌شود. همچنین واکنش تراکمی، پل‌های متیلن ($-\text{CH}_2-$) و پل‌های متیلن اتر را تشکیل می‌دهد ($-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$). بین واحدهای اوره و با فرمالدئید که به ارتعاشات خمشی C-H در حدود 1460 cm^{-1} و 1370 cm^{-1} و کشش C-N کمک می‌کنند (۲۴).



شکل ۸- طیف مادون قرمز تخته خورده چوب با سمی کاربازید و آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان.

Figure 8. Infrared spectrum of particleboard treated with carbazide and aminopropyltriethoxysilane.

تری اتوکسی سیلان به چسب اوره فرمالدئید و ساخت تخته خورده چوب موجب افزایش چسبندگی بین خرده چوب و چسب و نیز کاهش حفرات شده و سازگاری پلیمر و در نتیجه یکنواخت بودن سطح به همراه دارد. طیف FTIR ترکیبی از چسب اوره- فرمالدئید، سمی کاربازید و آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان، تجزیه و تحلیل دقیق موقعیت پیکها، شدت‌ها و شکل‌های باند، به ویژه در نواحی مربوط به ارتعاشات C=O، N-H، C-H و Si-O-Si، گروه‌های عاملی و استنباط برهمکنش‌های شیمیایی درون ماده نقش دارد. با توجه به این‌که استفاده از آمینو پروپیل تری اتوکسی موجب کاهش انتشار فرمالدئید و افزایش مقاومت مکانیکی تخته حاصل گردید. پیشنهاد می‌شود در ساخت تخته خورده چوب از ماده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی تخته و کاهش انتشار فرمالدئید استفاده شود.

نتیجه گیری

در این پژوهش، بررسی تأثیر افزودنی‌های سمی کاربازید بر خواص فیزیکی- مکانیکی و انتشار گاز فرمالدئید در تخته خورده چوب‌های ساخته شده با استفاده از چسب‌های شیراز و سامد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین مقاومت خمشی و چسبندگی داخلی در نمونه چسب شیراز ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسید و بیشترین مدول الاستیسیته خمشی در نمونه تولید شده با چسب شاهد شیراز می‌باشد. هم‌چنین کمترین جذب آب ۲ ساعته در چسب سامد مشهد ۶ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسید و جذب آب ۲۴ ساعته چسب شیراز ۶ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی و هم‌چنین بیشترین واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعته در چسب شیراز ۲ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسید و کمترین انتشار گاز فرمالدئید در ۶ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسید چسب سامد مشهد مشاهده شد. تصاویر SEM نشان داد اضافه کردن آمینو پروپیل

منابع

1. Kelleci, O., Koksall, S. E., Aydemir, D., & Sancar, S. (2022). Eco-friendly particleboards with low formaldehyde emission and enhanced mechanical properties produced with foamed urea-formaldehyde resins. *Journal of Cleaner Production*. 379 (2(15)), 134785.
2. Pirayesh, H. R., Khanjanzadeh, H., & Salari, A. (2013). Effect of using walnut/almond shells on the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard. *Composites Part B: Engineering*. 45(1), 858-863.
3. Liang, J., Wu, J., & Xu, J. (2021). Low-formaldehyde emission composite particleboard manufactured from waste chestnut bur. Springer Nature Link. 64(21).
4. Yadav, R. (2021). Development of low formaldehyde emitting particle board by nano particle reinforcement. *Journal of Applied and Natural Science*. 13(4), 1187-1197.
5. Medved, S., Tudor, E. M., Catalin Barbu, M., & Antonović, A. (2019). Efficiency of bark for reduction of formaldehyde emission from particleboards. *Wood Research*. 64(2), 307-316.
6. Warui Kariuki, S., Wachira, J., Kawira, M., & Murithi, G. (2019). Formaldehyde Use and alternative biobased binders for particleboard formulation: A review. *Journal of Chemistry*. 2019, 1-12.
7. Kameshki, B., Bayatkashkoli, A., Dahmardeh Ghalehno, M., Dahmardeh Behroz, R., & Shahreyare Moghddam, M. (2023). Evaluation of formaldehyde emission of medium density fiberboard made from with eco-friendly stabilizers and residue fibers of licorice root. *Journal of Forest and Wood Products*. 76(3), 269-282. [In Persian]
8. Asefi Hedayat Abad, M., Mansouri, H. R., Nosrati, B., Samzadeh, A., & Shirzaei, S. (2018). Reduction of emissions of formaldehyde from urea-formaldehyde (UF) resins using boards made with urea additive. *Forest and Wood Products*. 71(4), 335-345. [In Persian]
9. Ghani, A., Ashaari, Z., Bawon, P., & Lee, S.H. (2018). Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. *Building and Environment*. 142, 188-194.
10. Heydar, F., Mansouri, H., Sorinezami, Z., Dahmardeh Ghalehno, M., & Pizzi, A. (2022). Influence of additive of Chlorophytum comosum plant extract on physicochemical, structural and mechanical properties of urea formaldehyde resin. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 13(3), 361-373. [In Persian]
11. Yang, P., Zhu, Z., Wang, L., Shen, A., Tang, M., Chen, M., Cao, Y., Dai, H., & Zhou, X. (2023). Developing carbon dots as green modifiers for improving the bonding performance of low-molar-ratio urea-formaldehyde resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 125, 103416.
12. Zhao, Y., Zhang, S., Xu, Q., Wang, K., Yu, Y., Zhao, Q., Jiang, M., & Liu, P. (2024). Molecular dynamics simulation: The roles of silane coupling agent structural configurations on quartz fiber-epoxy interface. *Computational Materials Science*. 235, 112833.
13. Najahi, A., Aguado, R. J., Tarrés, Q., Boufi, S., & Delgado-Aguilar, M. (2023). Harvesting value from agricultural waste: Dimensionally stable fiberboards and particleboards with enhanced mechanical performance and fire retardancy through the use of lignocellulosic nanofibers.
14. Onat, S. M., & Kelleci, O. (2022). Effects of silane treatment on physical and mechanical properties of particleboards prepared with urea formaldehyde. *Drvna Industrija*. 73(4), 439-444.
15. Altgen, M., Altgen, D., Klüppel, A., & Rautkari, L. (2020). Effect of curing conditions on the water vapor sorption behavior of melamine formaldehyde

- resin and resin-modified wood. *Journal of Materials Science*. 55(25), 11253-11266.
16. Kord, B., Ghalehno, M. D., & Movahedi, F. (2020). Effect of imidazolium-based green solvents on the moisture absorption and thickness swelling behavior of wood flour/polyethylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 35(11), 2162-2176.
 17. Kaboorani, A. (2017). Characterizing water sorption and diffusion properties of wood/plastic composites as a function of formulation design. *Construction and Building Materials*. 136, 164-172.
 18. Cui, Y. H., Wang, X. X., Xu, Q., & Xia, Z. Z. (2010). Research on moisture absorption behavior of recycled polypropylene matrix wood plastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 24(1), 65-82.
 19. Kong, X., Wei, Z., Xia, S., Jia, B., Gan, L., & Han, S. (2023). The characterizations of nanofluid type urea formaldehyde resins. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 126, 103451.
 20. Asadi Khorramabadi, L., Behrooz, R., & Kazemi Najafi, S. (2023). Reduction of formaldehyde emission from medium density fiberboard using nanoclay modified with 3-aminopropyltriethoxysilane and L-Lysine as additives to urea-formaldehyde adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 125, 103426.
 21. Gao, Z. Z., Yue, C., Cao, H. B., Wang, X. B., Zhu, X. F., & Lin, R. H. (2012). Preparation and formaldehyde emission and bonding performance of novel modified urea-formaldehyde resin adhesive. *Advanced Materials Research*. Pp: 490-495, 3476-3480.
 22. Tjeerdsma, B. F., & Militz, H. (2005). Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*. 63(2), 102-111.
 23. Kumari Maddina, S., & Kandru, A. (2025). Identification of functional groups and chemical profiling of Ipomoea paracitica using FTIR spectroscopy. *International Journal on Biological Sciences*. 16(1), 17-26.
 24. Zorba, T., Papadopoulou, E., Hatjiissaak, A., Paraskevopoulos, K. M., & Chrissafis, K. (2008). Urea-formaldehyde resins characterized by thermal analysis and FTIR method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 92(1), 29-33.
 25. Chiang, T. C., Hamdan, S., & Osman, M. S. (2016). Urea formaldehyde composites reinforced with Sago fibres analysis by FTIR, TGA, and DSC. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016, 1-10.
 26. Yang, X., Li, Q., Huang, W., & Suo, N. (2015). Analysis of melamine-formaldehyde ware, urea-formaldehyde ware and covering coat of ware by FTIR spectrometry. In *Chemical Analysis and Meterage*.
 27. Zhang, W., Azizi-Lalabadi, M., Roy, S., Salim, S. A., Castro-Muñoz, R., & Jafari, S. M. (2023). Maillard-reaction (glycation) of biopolymeric packaging films; principles, mechanisms, food applications. *Trends in Food Science & Technology*. 138, 523-538.
 28. Tang, Q., Yang, Y., Lu, Y., Diao, S., Chen, Y., & Zhang, G. (2023). A highly durable reactive flame retardant with –N=P–(N)3– and phosphoric acid ester groups for cotton fabrics. *Cellulose*. 30(16), 10533-10550.
 29. Jin, F., Wu, X., Gao, F., Ge, H. L., Wang, S., Wang, Y., Wu, Q., & Yang, H. (2023). Developing a high response and low hysteresis humidity sensor based on C60-Lys. *Vacuum*. 214, 112242.
 30. Ta, T. K. H., Tran, T. N. H., Tran, Q. M. N., Pham, D. P., Pham, K. N., Cao, T. T., Kim, Y. S., Tran, D. L., Ju, H., & Phan, B. T. (2017). Surface functionalization of WO₃ thin films with (3-aminopropyl) triethoxysilane and

- succinic anhydride. *Journal of Electronic Materials*. 46(6), 3345-3352.
31. Okabayashi, H., Shimizu, I., Nishio, E., & Connor, C. J. O. (1997). Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectral study of the interaction of 3-aminopropyltriethoxysilane on silica gel. Behavior of amino groups on the surface. *Colloid & Polymer Science*. 275(8), 744-753.