



University of Tehran

Investigation of technical characteristics and formaldehyde emission from particleboard panels with thiocarbamide functional group

Behzad Kord^{1*} | Farnaz Movahedi² | Mehdi Roohani³

1. Corresponding Author, Cellulosic Materials and Packaging Research Group, Research Center of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Karaj, Iran. Email: b.kord@standard.ac.ir
2. Cellulosic Materials and Packaging Research Group, Research Center of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Karaj, Iran. Email: fzmovahedi@standard.ac.ir
3. Cellulosic Materials and Packaging Research Group, Research Center of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Karaj, Iran. Email: mroohani@standard.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 14 July 2025

Revised: 03 September 2025

Accepted: 18 September 2025

Published online: 22 November 2025

Keywords:

Formaldehyde emission,
Mechanical properties,
Particleboard,
Physical properties,
Scavengers.

ABSTRACT

This study focused on the influence of several novel scavengers on the physical, mechanical, and formaldehyde emission properties of particleboards produced with urea-formaldehyde (UF) resin. Three different scavengers with thiocarbamide functional groups thiourea, thioacetamide, and thiosemicarbazide were incorporated into the UF resin at 2%, 4%, and 6% (by weight) loading levels based on the oven-dried weight of the resin. All single-layer particleboards were produced under laboratory conditions. The formaldehyde emission, modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bond strength (IB), water absorption, and thickness swelling of the specimens were determined according to relevant standards. Moreover, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) was used to investigate the effect of the scavengers' functional groups on formaldehyde reduction. The results indicated that formaldehyde emission from the particleboard panels decreased significantly with increasing scavenger content. The lowest formaldehyde emission was observed in specimens containing thiosemicarbazide (0.42 mg/L), followed by thiourea (0.46 mg/L) and thioacetamide (0.49 mg/L) at a 6 wt% loading level. The formaldehyde emission of the control samples was 0.71 mg/L. Evaluation of the physical and mechanical properties showed that mechanical strength parameters including MOR, MOE, and IB decreased with increasing scavenger content, while water absorption and thickness swelling increased. Based on the results, all treatments met the requirements for particleboards intended for interior fitments for use in dry conditions (P2 grade) according to the EN 312 standard.

Cite this article: Kord, B., Movahedi, F., Roohani, M. (2025). Investigation of technical characteristics and formaldehyde emission from particleboard panels with thiocarbamide functional group. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (3), 235-251. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.398562.1356>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.398562.1356>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

بررسی خواص فنی و میزان انتشار فرمالدهید از پانل‌های تخته خرده چوب دارای گروه عاملی تیوکاربامید

بهزاد کرد^{۱*} | فرناز موحدی^۲ | مهدی روحانی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: b.kord@standard.ac.ir

۲. گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: fzmovahedi@standard.ac.ir

۳. گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: mroohani@standard.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

کلیدواژه:

انتشار فرمالدهید،

تخته خرده چوب،

خواص فیزیکی،

خواص مکانیکی،

ماده جاذب.

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر استفاده از برخی جاذب‌های جدید بر خواص فیزیکی، مکانیکی و میزان انتشار فرمالدهید تخته‌خرده چوب ساخته شده با رزین اوره فرمالدهید انجام شد. برای انجام این پژوهش، سه جاذب مختلف دارای گروه عاملی تیوکاربامید، به نام‌های تیواوره، تیواستامید، و تیوسمی کاربازید در سطوح بارگذاری ۲، ۴ و ۶ درصد (وزنی) براساس وزن خشک رزین، به اوره فرمالدهید اضافه شدند. تمام تخته خرده چوب‌ها در شرایط آزمایشگاهی تولید شدند. سرانجام خواص فیزیکی، مکانیکی و میزان انتشار فرمالدهید نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین به‌منظور مطالعه تأثیر گروه‌های عاملی ماده جاذب بر فرمالدهید، از طیف‌سنج مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. نتایج نشان داد مقدار فرمالدهید آزاد شده از پانل‌های تخته خرده چوب با افزودن مقدار ماده جاذب به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. کمترین میزان انتشار فرمالدهید به‌ترتیب در نمونه‌های حاوی تیوسمی کاربازید (۰/۴۲ میلی گرم در لیتر)، و پس از آن در تیواوره (۰/۴۶ میلی گرم در لیتر) و تیواستامید (۰/۴۹ میلی گرم در لیتر) در سطح بارگذاری، شش درصد مشاهده شد. مقدار فرمالدهید آزاد شده از نمونه‌های شاهد، معادل ۰/۷۱ میلی گرم در لیتر گزارش شد. یافته‌های حاصل از ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی نشان داد استحکام مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی نمونه‌ها با افزودن ماده جاذب کاهش می‌یابد، در حالی که جذب آب و واکنشیدگی ضخامت افزایش می‌یابد. با استناد به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت استفاده از پانل‌های تخته خرده چوب در تمام تیمارهای مورد مطالعه برای مصارف داخل ساختمان و شرایط خشک (P_2)، مطابق الزامات فنی تعریف شده در استاندارد EN 312 می‌باشد.

استناد: کرد: بهزاد، موحدی؛ فرناز، روحانی؛ مهدی (۱۴۰۴). بررسی خواص فنی و میزان انتشار فرمالدهید از پانل‌های تخته خرده چوب دارای گروه عاملی تیوکاربامید. نشریه جنگل و

فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۳)، ۲۳۵-۲۵۱. DOI: <https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.398562.1356>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.398562.1356>



۱. مقدمه

پانل‌های چوبی به‌طور گسترده در سراسر جهان در تولید مبلمان، کفپوش، دکوراسیون داخلی و سایر مصنوعات چوبی داخل ساختمان کاربرد دارند. در این میان، تخته خرده چوب پرکاربردترین آن به‌شمار می‌رود [۱]. کل تولید پانل‌های چوبی بنا بر گزارش فدراسیون پانل اروپا (EFP) در سال ۲۰۲۴، ۵۷/۴ میلیون متر مکعب بوده است که از این مقدار، تخته خرده چوب (۳۱/۲ میلیون متر مکعب)، تخته MDF (۱۱/۲ میلیون متر مکعب) تخته تراشۀ جهت‌دار (۶/۹ میلیون متر مکعب)، تخته فیبر سبک (۵/۲ میلیون متر مکعب)، تخته لایه (۲/۶ میلیون متر مکعب)، و تخته فیبر سنگین (۳۰۰ هزار متر مکعب) را به‌خود اختصاص داده‌اند. براساس گزارش EFP تولید تخته خرده چوب نسبت به سال ۲۰۲۳، شاهد رشد اندکی در حدود یک درصد بوده است. همچنین در سال ۲۰۲۴ صنعت مبلمان بزرگترین مصرف‌کننده پانل‌های چوبی در کشورهای اروپایی است که ۴۹ درصد از کل تولید را به‌خود اختصاص داده است، و پس از آن به‌ترتیب صنعت ساخت و ساز (۳۸ درصد)، بسته‌بندی (۳ درصد) و سایر کاربردها (۱۰ درصد) قرار دارند [۲].

اوره فرمالدهید به‌دلیل مزایای قابل توجه آن مانند هزینه کم، تهیه آسان، رنگ شفاف، انحلال‌پذیری خوب در آب، سختی بالا، دمای انعقاد (گیرایی) پایین و نیز خواص حرارتی مناسب، پرکاربردترین چسب مصنوعی در تولید پانل‌های چوبی برای کاربردهای داخل ساختمان به‌شمار می‌رود. با وجود مزایای قابل توجه ذکر شده، مقاومت کم در برابر رطوبت و انتشار گاز فرمالدهید در هنگام ساخت تخته و مصرف محصول نهایی به‌عنوان نقاط ضعف اصلی این چسب محسوب می‌شود [۳ و ۴]. فرمالدهید یک ماده بی‌رنگ، سمی و با بوی تند است که استنشاق آن با تراکم زیاد باعث تورم شدید در دستگاه تنفسی فوقانی و از بین رفتن بافت‌های سطحی مخاط آن می‌شود، یا حتی مقدار کم آن موجب حساسیت پوستی و سرطان می‌گردد و به همین دلیل از طرف سازمان بهداشت جهانی (WHO) محدودیت‌هایی بر میزان انتشار گاز فرمالدهید از پانل‌های چوبی وضع شده است. در این راستا، وضعیت فرمالدهید از مواد سرطان‌زا طبقه ۳ (هنوز آثار آن مشخص نشده) به طبقه ۱ (ثابت شده که سرطان‌زا می‌باشد) تغییر کرده است [۵ و ۶]. براساس مطالعات انجام شده، عوامل متعددی مانند نسبت مولی اوره به فرمالدهید، نوع رزین و مقدار آن، نوع ماده سخت‌کننده (هاردنر) و مقدار آن، میزان پارافین، ضخامت و دانسیته تخته، میزان رطوبت کیک، متغیرهای فرآیند تولید (دما، فشار و زمان پرس)، مدت زمان نگهداری پس از تولید، نوع روکش، و شرایط محیطی در حین سرویس (دما و رطوبت نسبی)، بر انتشار فرمالدهید از پانل‌های چوبی دخالت دارند [۷ و ۸]. پانل‌های چوبی براساس میزان انتشار فرمالدهید (از حداقل تا حداکثر) به‌ترتیب به طبقه‌های E_0 ، E_1 ، E_2 و E_3 تقسیم‌بندی می‌شوند. به‌دلیل اثرات مضر فرمالدهید، بسیاری از کشورها فقط طبقه E_1 و با انتشار کمتر پانل‌های چوبی را مجاز می‌دانند. از طرفی، افزایش آگاهی مردم و مقررات قانونی، تولیدکنندگان پانل و رزین را مجبور به کاهش بیشتر انتشار فرمالدهید کرده است [۹]. در کنار تغییر در فرمولاسیون چسب اوره فرمالدهید و استفاده از چسب‌های بدون فرمالدهید، افزودن مواد جاذب (مهارکننده) به پانل چوبی در حین تولید به‌عنوان ساده‌ترین راه برای کاهش میزان انتشار فرمالدهید به‌شمار می‌رود [۸-۵]. تحقیقات و مطالعات بسیاری در زمینه کاهش انتشار فرمالدهید از پانل‌های چوبی انجام شده است. به‌عنوان مثال، Sensogut و همکاران (۲۰۰۹) اثر افزودن پنتاهیدرات بوراکس به اوره فرمالدهید را بر روی ویژگی‌های مکانیکی و مقدار فرمالدهید آزاد در تخته لایه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که افزودن پنتاهیدرات بوراکس به ترکیب چسب اثر قابل توجهی بر روی مقاومت خمشی و برشی تخته لایه نداشت، اما موجب کاهش مقدار فرمالدهید آزاد از تخته‌ها می‌شود [۱۰]. Costa و همکاران (۲۰۱۳) اثرات متابولی سولفیت سدیم، بی سولفیت آمونیوم و اوره را بر انتشار فرمالدهید تخته خرده چوب بررسی کردند. در میان جاذب‌ها، متابولی سولفیت سدیم، بهترین افزودنی بود که تخته خرده چوب‌هایی با انتشار فرمالدهید صفر (E_0) تولید کرد [۱۱]. Ibrahimejad (۲۰۱۵) گزارش کرد با افزودن مقدار ۰/۵ درصد دی‌اکسید تیتانیوم به تخته MDF، میزان انتشار فرمالدهید در تخته ساخته شده با چسب E_1 ، ۸۱/۳ درصد و در تخته‌های حاوی چسب E_2 ، ۶۶/۸ درصد کاهش یافت [۱۲]. Younesi Kordkheili و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر نانوذرات رس (در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی) بر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی، ساختاری و حرارتی چسب اوره فرمالدهید پرداختند. آنها دریافتند که با افزودن نانوذرات رس به چسب اوره، دانسیته، ویسکوزیته و درصد ماده جامد چسب افزایش پیدا می‌کند، درحالی‌که مقدار فرمالدهید آزاد و زمان ژله‌ای شدن چسب کاهش می‌یابد [۱۳]. Dentinho (۲۰۱۷) از نانوذرات سیلیس متخلخل، به‌عنوان کاتالیزور در مرحله سنتز رزین اوره فرمالدهید استفاده کرد و موفق شد میزان انتشار فرمالدهید را از طریق کپسوله کردن اسید

درون منافذ نانوذرات سیلیس، کاهش دهد [۱۴]. Ghani و همکاران (۲۰۱۸) از ترکیبات آمین‌دار (متیل‌آمین، اتیل‌آمین و پروپیل‌آمین) به‌عنوان جاذب فرمالدهید در ساخت تخته خرده‌چوب استفاده کردند و نشان دادند که مقاومت در برابر آب و خواص مکانیکی تخته‌ها، تحت تأثیر منفی افزودن آمین‌ها قرار گرفت، در حالی که انتشار فرمالدهید از نمونه‌ها با افزودن آمین‌ها کاهش یافت [۱۵]. Shalbafan و همکاران (۲۰۲۰) از کیتوزان و مشتقات آن (کیتوزان اصلاح شده و نانوکیتوزان) به‌عنوان جاذب‌های زیستی برای جذب فرمالدهید از اوراق فشرده چوبی استفاده کردند و دریافتند که هنگام استفاده از جاذب‌های مختلف برپایه کیتوزان، بلورینگی رزین چسب اوره فرمالدهید و مقدار فرمالدهید آزاد شده از تخته‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی در خواص فیزیکی و مکانیکی اوراق فشرده چوبی با افزودن کیتوزان تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. به‌طور کلی، کاهش انتشار فرمالدهید از تخته فیبر MDF حاوی نانوکیتوزان به‌میزان ۶۰ درصد، کیتوزان اصلاح شده به میزان ۳۴ درصد، پودر کیتوزان خالص به‌میزان ۲۲ درصد گزارش شد [۱۶]. Kord و همکاران (۲۰۲۲) با به‌کارگیری سه نوع ترکیب فنولیک شامل آلزارین سولفونات Red-S، آلزارین Yellow-GG و کروموتروپیک اسید در ساخت تخته خرده چوب دریافتند که میزان انتشار فرمالدهید با افزودن این جاذب‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. آنها کمترین میزان انتشار فرمالدهید را به‌ترتیب در تخته‌های ساخته شده از آلزارین سولفونات Red-S، کروموتروپیک اسید و آلزارین Yellow-GG گزارش کردند [۱۷]. همچنین در مرور منابع، استفاده از جاذب‌های طبیعی مانند پوسته برنج [۱۸]، آرد مخروط کاج [۱۹]، لجن کاغذ [۲۰]، آرد پوسته شاه بلوط [۲۱]، تانن [۲۲]، آرد ذرت [۲۳]، لیگنین کرافت [۲۴]، کربن فعال [۲۵]، آرد سویا [۲۶]، و ژئوپلیمرهای طبیعی [۲۷]، به‌عنوان کاهنده میزان انتشار فرمالدهید از پانل‌های چوبی اشاره شده است.

بررسی مطالعات انجام شده و مرور منابع مشخص نمود مواد جاذب شیمیایی با تشکیل کمپلکس از طریق درگیر شدن سایت‌های فعال خود با فرمالدهید موجود در رزین، باعث مهار فرمالدهید و کاهش میزان انتشار آن از پانل‌های چوبی می‌شوند. از این‌رو پژوهش حاضر با استناد به این یافته‌ها و همچنین بهره‌گیری از نظریه اسید-باز نرم و سخت^۱، بر انتخاب ترکیبات شیمیایی دارای گروه عاملی تیوکاربامید ($H_2N-C=S$) و شکل‌های مختلف آن (مانند تیواوره، تیواستامید، و تیوسمی کاربازید) به‌عنوان جاذب در ساخت تخته خرده چوب با رزین اوره فرمالدهید، متمرکز شد. جنبه نوآورانه پژوهش حاضر آن است که طراحی شکل‌های مختلف از این ماده جاذب، می‌تواند مکانیسم‌های متفاوتی را در به دام انداختن فرمالدهید ایفاء نماید. این مسئله برای اولین بار در پانل‌های چوبی مورد بررسی مطالعه قرار گرفته است. در ادامه این پژوهش، خواص فیزیکی و مکانیکی تخته خرده چوب‌های دارای گروه عاملی تیوکاربامید با تخته‌های فاقد ماده جاذب (نمونه شاهد) نیز مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

در این پژوهش، خرده چوب صنعتی (مخلوط گونه‌های جنگلی شامل: توسکا، اکالیپتوس، صنوبر، راش و افرا) از کارخانه تخته فشرده ممتاز شمال تهیه شد. خرده چوب‌ها با استفاده از خشک‌کن آزمایشگاهی (دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان ۷۲ ساعت) تا دستیابی به رطوبت سه درصد خشک و مورد استفاده قرار گرفت. رزین اوره فرمالدهید از شرکت چسب سامد مشهد خریداری شد. مشخصات رزین اوره فرمالدهید در جدول یک ارائه شده است. کلرید آمونیوم به‌عنوان کاتالیزور برای انعقاد بهتر و سریع‌تر چسب در هنگام پرس استفاده گردید. تیوکاربامید یا تیواوره (CH_4N_2S) با وزن مولکولی ۷۶/۱۲ گرم بر مول، اتان تیوآمید یا تیواستامید (C_2H_5NS) با وزن مولکولی ۷۵/۱۳ گرم بر مول، و تیوسمی کاربازید (CH_5N_3S) با وزن مولکولی ۹۱/۱۴ گرم بر مول به‌عنوان جاذب‌های شیمیایی فرمالدهید مورد استفاده قرار گرفت. ساختار شیمیایی مواد جاذب در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲. آنالیز طیف‌سنجی

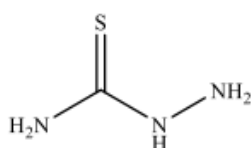
به‌منظور مطالعه تأثیر گروه‌های عاملی ماده جاذب بر فرمالدهید، از طیف‌سنج مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. محلول فرمالدهید خالص، پودر ماده جاذب، و مخلوط فرمالدهید-ماده جاذب مورد آنالیز قرار گرفتند. آزمون طیف‌سنجی نمونه‌ها در دمای محیط، و

¹ Hard Soft Acid Base (HSAB)

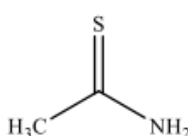
دائمه عدد موجی ۴۰۰-۴۰۰۰ سانتی‌متر معکوس، با قدرت تفکیک ۴ سانتی‌متر معکوس انجام شد. دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل Bruker Vertex 70v ساخت کشور آلمان جهت انجام این آزمون مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. مشخصات رزین اوره فرمالدهید مورد استفاده

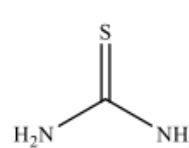
ماده جامد (درصد)	ویسکوزیته (سانتی‌پوآز)	زمان ژله‌ای شدن (ثانیه)	دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	pH
۶۳	۶۰	۵۶	۱/۲۷۰	۷/۵



(ج) تیوسمی کاربازید



(ب) تیواستامید



(الف) تیواوره

شکل ۱. ساختار شیمیایی جاذب‌های مورد استفاده

۲-۳. ساخت تخته خرده چوب

فرآیند ساخت تخته‌ها پس از تعیین درصد رطوبت ذرات خرده چوب و با در نظر گرفتن میزان مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت هر تخته، انجام شد. پس از اختلاط خرده چوب‌ها با نسبت‌های تعیین شده، ذرات در درون چسبزن استوانه‌ای شکل ریخته شده و عمل چسب‌پاشی به همراه کاتالیزور بر روی خرده چوب‌ها انجام گرفت. پس از پایان چسب‌زنی، مواد داخل استوانه چسبزن به مدت ۵ دقیقه به چرخش خود ادامه دادند تا عمل مخلوط شدن چسب با خرده چوب‌ها به‌طور تقریباً یکنواخت انجام شود. برای شکل دادن کیک خرده چوب از یک قالب به ابعاد $16 \times 300 \times 300$ میلی‌متر استفاده شد، پس از تشکیل کیک خرده چوب با استفاده از یک پرس هیدرولیکی اقدام به ساخت تخته‌های آزمایشگاهی شد. پس از عملیات پرس و به‌منظور به‌دست آوردن تخته‌ای با جرم ویژه نسبتاً یکنواخت، تمامی تخته‌های آزمونی به‌میزان ۲۵ میلی‌متر از هر چهار طرف، کناره‌بری شدند. سرانجام نمونه‌های آزمونی با توجه به نوع ویژگی مورد مطالعه، مطابق با الزامات فنی تعریف شده در استانداردهای مربوطه، برش داده شدند. سپس نمونه‌های برش خورده به مدت دو هفته در اتاق مشروطه‌سازی (کلیماتیزه) با شرایط رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای 20 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به تعادل رطوبتی با محیط اطراف برسند. دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، فشار پرس ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، سرعت بسته شدن پرس ۴/۵ میلی‌متر بر دقیقه، زمان پرس ۷ دقیقه و دانسیته تخته ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ثابت در نظر گرفته شد. رزین اوره فرمالدهید به‌میزان ۱۰ درصد (براساس وزن خشک خرده چوب)، کلرید آمونیوم به میزان ۲ درصد (براساس وزن خشک چسب)، و مواد جاذب در سه سطح ۲، ۴ و ۶ درصد (براساس وزن خشک رزین) استفاده شد.

۲-۴. اندازه‌گیری ویژگی‌ها

۲-۴-۱. اندازه‌گیری میزان انتشار فرمالدهید

میزان فرمالدهید آزاد شده از تخته‌های ساخته شده با روش دسیکاتور مطابق استاندارد ISO 12460-4 [۲۸]، انجام شد. برای این منظور، نمونه‌های تخته خرده چوب بعد از تولید به ابعاد 50×150 میلی‌متر و ضخامت معین (δ) اسمی تخته، برش خورده و به مدت ۷ روز در اتاق مشروطه‌سازی در دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 5 ± 65 درصد قرار داده شدند. پس از مشروطه‌سازی، نمونه‌ها بر روی توری سیمی از جنس استیل ضد زنگ با فاصله کمی از سطح آب دیونیزه موجود در ظرف شیشه‌ای، درون دسیکاتور قرار گرفتند. سپس دسیکاتور درون اتاقک با دمای 2 ± 20 درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. پس از گذشت این

زمان، از آب مقطر قرارداده شده درون دسیکاتور نمونه‌برداری شد. برای تعیین میزان فرمالدهید آزاد شده از نمونه‌های درون دسیکاتور، میزان ۲۵ میلی‌لیتر از آب مقطر درون دسیکاتور به‌همراه ۲۵ میلی‌لیتر از محلول استیل استون-آمونیم استات مخلوط شدند و به‌مدت ۱۰ دقیقه درون حمام آب داغ با دمای 2 ± 65 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس محلول به‌مدت یک ساعت به دور از نور نگهداری شد. در مرحله آخر نیز از طریق اسپکتوفتومتری در طول موج ۴۱۲ نانومتر، میزان فرمالدهید جذب شده در محلول آبی داخل دسیکاتور تعیین شد. در این روش، اندازه‌گیری انتشارفرمالدهید براساس واکنش هانش (Hanzsch) می‌باشد، که طی آن فرمالدهید با یون آمونیوم و استیل استون واکنش داده و منجر به تولید دی استیل دی هیدرولوتیدین (DDL) می‌گردد. ماده شیمیایی DDL دارای حداکثر جذب در طول موج ۴۱۲ نانومتر می‌باشد [۲۸]. غلظت فرمالدهید آزاد شده (G) به‌صورت میلی‌گرم فرمالدهید در لیتر بیان شده و مقدار آن با توجه به رابطه ۱ محاسبه شد.

$$G = [f \times (\alpha_d - \alpha_b) \times 1800] \div A \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه بالا، α_d : جذب محلول داخل دسیکاتور محتوی نمونه آزمونی، α_b : جذب محلول فرمالدهید زمینه، f: شیب نمودار کالیبراسیون، و A: مساحت نمونه آزمونی بر حسب سانتی‌متر مربع می‌باشد.

۲-۴-۲. اندازه‌گیری خواص فیزیکی

آزمون جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها، مطابق با استاندارد EN 317 [۲۹]، انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن و ضخامت نمونه‌ها از یک ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم و یک کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. در این آزمون، نمونه‌ها در داخل آب هم‌دم با محیط غوطه‌ور شدند و در زمان‌های ۲ و ۲۴ ساعت وزن و ضخامت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و براساس روابط ریاضی ذکر شده در استاندارد، مقدار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت محاسبه شد.

۲-۴-۳. اندازه‌گیری خواص مکانیکی

آزمون خمش سه نقطه‌ای نمونه‌ای نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN 310 [۳۰]، برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته انجام شد. این آزمون به‌وسیله ماشین تست مکانیکی اینسترون با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. آزمون چسبندگی داخلی نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN 319 [۳۱]، انجام شد. ابعاد نمونه‌ها 50×50 میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر در دقیقه تعیین شد.

۲-۵. تجزیه و تحلیل نتایج

تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به خواص فیزیکی و مکانیکی تخته خرده چوب با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار آماری SPSS در سطح اطمینان ۹۹ درصد انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

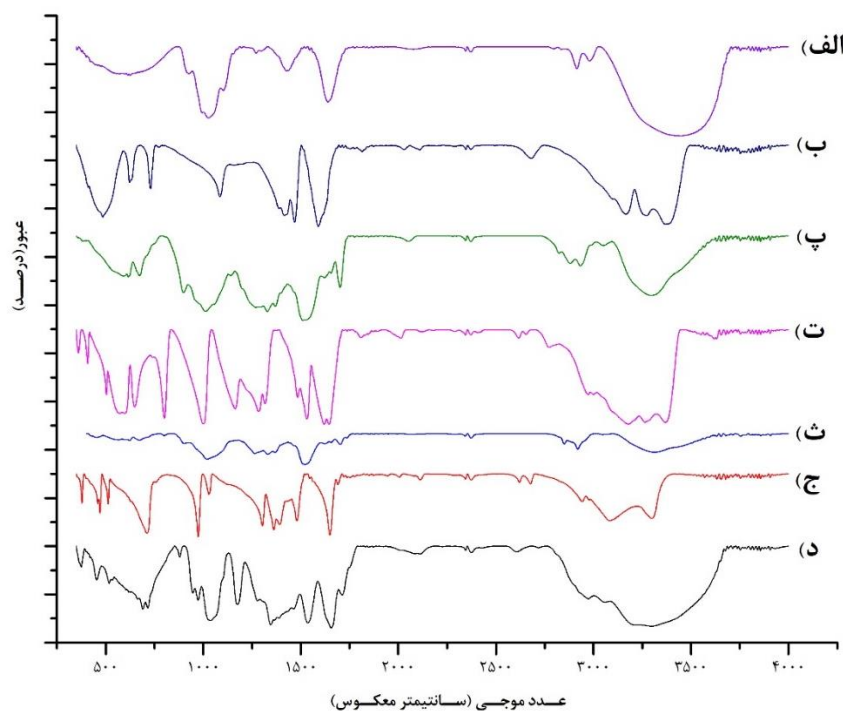
۳-۱. تفسیر طیف مادون قرمز

طیف‌های مادون قرمز فرمالدهید خالص، مواد جاذب، و مخلوط فرمالدهید- ماده جاذب در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ (الف) مشاهده می‌شود، پیک پهن در محدوده ۳۳۰۰-۳۵۰۰ سانتی‌متر معکوس مربوط به ارتعاشات گروه‌های هیدروکسیل فرم هیدراته فرمالدهید و گروه‌های هیدروکسیل آب و متانول مخلوط با فرمالدهید می‌باشند. پیوندهای هیدروژنی باعث شدت یافتن و پهن شدن پیک ظاهر شده در این ناحیه با مرکزیت ۳۴۳۹ سانتی‌متر معکوس شده است. پیک‌های جذبی در ۲۹۲۲ و ۲۸۳۵ سانتی‌متر معکوس به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن پیوند C-H فرمالدهید و متانول اشاره دارد. پیک جذبی پهن در

محدوده ۱۳۰۰-۱۵۰۰ سانتی‌متر معکوس، مربوط به ارتعاشات خمشی C-H فرمالدهید و متانول می‌باشد. در نهایت ارتعاشات کششی پیوند C-O منجر به ظهور پیک جذبی قوی در ۱۰۳۱ سانتی‌متر معکوس شده است. در شکل ۲ (ب)، در محدوده ۳۲۰۰-۳۵۰۰ سانتی‌متر معکوس دو پیک واضح و تیز که به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن پیوند N-H اختصاص دارد به ترتیب در ناحیه ۳۳۷۶ و ۳۲۷۸ سانتی‌متر معکوس ظاهر شده اند. پیک قوی در ناحیه ۱۵۹۲ سانتی‌متر معکوس مربوط به ارتعاشات خمشی متقارن گروه NH_2 می‌باشد. ارتعاشات کششی C-N منجر به ظهور پیک جذبی در محدوده ۱۳۴۰-۱۴۸۰ سانتی‌متر معکوس می‌شود که شدت آن به میزان ارتعاشات کششی پیوند C-N و محل دقیق آن به میزان رزونانس میان پیوند $\text{C}=\text{S}$ و C-N بستگی دارد. ظهور پیک جذبی در ناحیه ۱۰۸۵ سانتی‌متر معکوس منتسب به ارتعاشات کششی گروه $\text{C}=\text{S}$ می‌باشد. در شکل ۲ (پ)، وجود پیک جذبی پهن در دامنه ۳۰۰۰-۳۵۰۰ سانتی‌متر معکوس، برخاسته از ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن گروه‌های N-H و پیوندهای هیدروژنی میان سولفور گروه‌های تیونیل با هیدروژن‌های گروه آمیدی و آمینی می‌باشد که مرکزیت این پیک پهن در ناحیه ۳۳۰۳ سانتی‌متر معکوس تعیین می‌شود و البته پهن شدن این پیک نیز به شکل‌گیری همین پیوندهای هیدروژنی نسبت داده می‌شود. ظهور دو پیک تیز و قوی در ۲۹۳۷ و ۲۸۷۳ سانتی‌متر معکوس ناشی از ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن گروه‌های CH_2 می‌باشد. ارتعاشات کششی $\text{C}=\text{S}$ در ناحیه ۱۰۱۷ سانتی‌متر معکوس و پیک جذبی ۱۵۳۹ سانتی‌متر معکوس مربوط به ارتعاشات خمشی پیوندهای C-H گروه‌های CH_2 -N، در زمره ارتعاشات ویژه ناشی از تشکیل تیواوره- فرمالدهید هستند. در شکل ۲ (ت)، پیک‌های دوگانه در محدوده ۳۲۰۰-۳۴۰۰ سانتی‌متر معکوس نشان‌دهنده ارتعاشات کششی N-H در بخش آمیدی و هیدرازین تیوسمی کاربازید می‌باشد که با توجه به همپوشانی مابین ارتعاشات کششی آنها و وجود پیوندهای هیدروژنی، پهن‌شدگی پیک در این ناحیه مشاهده می‌شود. پیک‌های گسترده ظاهر شده در محدوده ۴۰۰-۱۵۰۰ سانتی‌متر معکوس به ارتعاشات مختلف مولکولی از جمله ارتعاشات خمشی C-N و ارتعاشات اسکلتی مرتبط می‌باشند. در شکل ۲ (ث)، ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن N-H در کنار ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل طیف جذبی پهنی در ۳۱۰۵-۳۶۳۰ سانتی‌متر معکوس با مرکزیت ۳۳۱۳ سانتی‌متر معکوس تشکیل می‌دهد، هر چند پهن‌شدگی و در نتیجه کم شدن شدت همین پیک، احتمال شکل‌گیری پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی را میان گروه‌های تیونیل با هیدروژن گروه‌های آمیدی را تقویت می‌کند. دو باند جذبی قوی در ۲۹۲۱ و ۲۸۵۳ سانتی‌متر معکوس برگرفته از ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن گروه‌های CH_2 و پیک جذبی در ۱۰۳۳ سانتی‌متر معکوس مربوط به ارتعاشات $\text{C}=\text{S}$ می‌باشند. در شکل ۲ (ج)، پیک‌های جذبی تیز و قوی در دامنه ۳۰۰۰-۳۴۰۰ سانتی‌متر معکوس مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن N-H تیواستامید می‌باشند. پیک جذبی قوی در ناحیه ۲۹۴۰ سانتی‌متر معکوس برخاسته از ارتعاشات کششی C-H هستند و پیک جذبی ۱۶۵۲ سانتی‌متر معکوس ناشی از ارتعاشات خمشی N-H تشخیص داده می‌شوند. در شکل ۲ (د)، با توجه به قابلیت افزایش پیوندهای هیدروژنی و گروه‌های هیدروکسیل، پهن‌تر شدن ناحیه اثر انگشت پیوندهای N-H در بازه ۳۰۰۰-۳۶۰۰ سانتی‌متر معکوس معقول به نظر می‌رسد. از سویی دیگر شدت پیک جذبی گروه‌های C-H در ۲۹۶۷ سانتی‌متر معکوس با توجه به افزایش تعداد گروه‌های متیلنی بیشتر شده است. پیک جذبی قوی در ناحیه ۱۰۴۷ سانتی‌متر معکوس مربوط به ارتعاشات کششی C-N می‌باشند [۳۲ و ۳۳].

۳-۲. انتشار فرمالدهید

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر میزان انتشار فرمالدهید تخته خرده چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۲). در شکل ۳ اثر نوع و مقدار مواد جاذب بر میزان انتشار فرمالدهید نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. مطابق شکل، فرمالدهید آزاد شده از نمونه‌ها، با افزودن ماده جاذب کاهش می‌یابد. دلیل آن را می‌توان به کاهش تراکم باندهای متیلنی در زنجیره رزین اوره فرمالدهید هنگام افزودن مواد جاذب دارای گروه عاملی تیوکاربامید ($\text{H}_2\text{N}-\text{C}=\text{S}$) نسبت داد که موجب به دام انداختن فرمالدهید و ممانعت از خروج آن می‌شود [۱۷]. کمترین میزان انتشار فرمالدهید در نمونه‌های حاوی تیوسمی کاربازید، و پس از آن به ترتیب در تیواوره و تیواستامید مشاهده شد. میزان انتشار فرمالدهید در نمونه‌های شاهد (فاقد ماده جاذب) معادل ۰/۷۱ میلی‌گرم در لیتر گزارش شد.

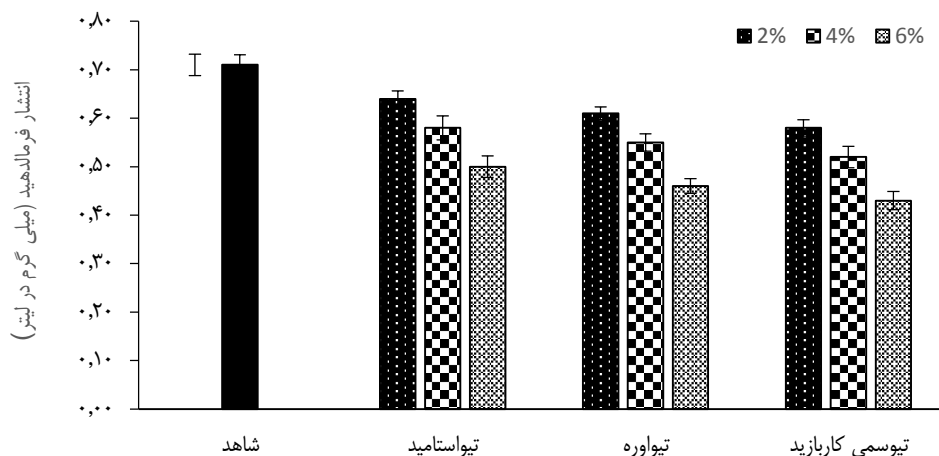


شکل ۲. طیف مادون قرمز (الف) فرمالدهید، (ب) تیواوره، (پ) فرمالدهید-تیواوره، (ت) تیوسمی کاربازید، (ث) فرمالدهید-تیوسمی کاربازید، (ج) تیواستامید و (د) فرمالدهید-تیواستامید

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر میزان انتشار فرمالدهید تخته خرده چوب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
نوع ماده جاذب	۰/۲۱۱	۳	۰/۰۷۰	۹۳۶	۰/۰۰۰**
مقدار ماده جاذب	۰/۰۷۳	۲	۰/۰۳۷	۴۸۹/۳۳۳	۰/۰۰۰**
نوع × مقدار ماده جاذب	۰/۰۲۵	۶	۰/۰۰۴	۵۴/۶۶۷	۰/۰۰۰**
خطا	۰/۰۰۲	۲۴	$۷/۵ \times 10^{-5}$		
کل	۰/۳۱۰	۳۵			

** - معنی‌دار در سطح ۱ درصد



شکل ۳. تأثیر نوع و مقدار مواد جاذب بر میزان انتشار فرمالدهید تخته خرده چوب

مکانیسم‌های احتمالی جهت به دام انداختن فرمالدهید و کاهش انتشار آن از تخته خرده چوب با استفاده از مواد جاذب دارای گروه عاملی تیوکاربامید ($H_2N-C=S$) به صورت شماتیک در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ نشان داده شده است. ساختار تیواوره به گونه‌ای است که در آن دو گروه آمین در مجاورت با تیونیل ($C=S$) وجود دارد و در واقع زوج‌های ناپیوندی هر دو نیتروژن مجاور سایت تیونیل در رزونانس با پیوند دوگانه ($C=S$) می‌باشند که همین امر، منجر به کاهش قدرت نوکلئوفیلی این دو سایت نیتروژن شده است. هر چند، دو سایت نیتروژن نوکلئوفیل N_1 و N_2 در تیواوره که هر دو به طور بالقوه قادر به حمله نوکلئوفیلی هستند، با وجود رزونانس جفت الکترون‌های ناپیوندی نیتروژن با گروه تیونیل که منجر به کاهش تراکم الکترونی بر روی آنها می‌شود، باعث افزایش احتمال حمله نوکلئوفیلی در این ساختار خواهد شد. حضور دو نیتروژن معادل موجب می‌شود حتی اگر زوج ناپیوندی در یکی از نیتروژن‌ها در رزونانس با تیونیل باشد، دیگری بتواند به عنوان یک نوکلئوفیل عمل کند. ذکر این نکته ضروری است که با وجود رزونانس و در ظاهر تمرکز بار منفی بر روی سایت گوگرد، حمله نوکلئوفیلی به آلدهیدها، به عنوان نمونه فرمالدهید، از سایت گوگرد صورت نگرفته و این مکانیسم با تکیه بر نظریه اسید-باز نرم و سخت (HSAB) همان گونه که در مقالات علمی پیش از این نیز گزارش شده است، صحیح به نظر می‌رسد [۳۲]. پس از حمله نوکلئوفیلی از سایت نیتروژن به کربن فرمالدهید، یک حدواسط تتراهدرال تشکیل خواهد شد که در صورت اسیدی بودن محیط واکنش، گروه هیدروکسیل پروتون‌دار شده و به صورت آب حذف خواهد شد. از آنجا که نیتروژن حمله‌کننده، بار مثبت پیدا کرده و تحت فشار می‌باشد، حمله نوکلئوفیلی از سوی نیتروژن یک تیواوره دیگر به گروه متیلن، منجر به رهايش نیتروژن از بار مثبت خواهد شد. زنجیره واکنش میان نیتروژن‌های واکنش نداده/واکنش داده تیواوره‌های درگیر واکنش تراکم نوکلئوفیلی، با سایر فرمالدهیدها در نهایت منجر به تشکیل رزین تیواوره-فرمالدهید (TUFR) خواهد شد [۳۲]. در تیوسمی کاربازید، گروه تیونیل‌دار با سه سایت نیتروژن در مجاورت آن وجود دارد، که یکی از آنها در سیستم رزونانس به دلیل دور بودن از تیونیل، مشارکت نکرده و در نتیجه به عنوان سایت مستقل آمینی جهت حمله نوکلئوفیلی عمل می‌کند. بخش تیواوره در ساختار تیوسمی کاربازید، مکانیسم عملکردی مشابه ماده تیواوره را دارد و در محیط اسیدی، واکنش تراکمی با حمله نوکلئوفیلی بخش آمینی سمی تیوکاربازید آغاز می‌شود و با واکنش سایت نیتروژن تیوکاربامید آن ادامه می‌یابد، به طوری که پس از چندین مرحله واکنش افزایشی-تراکمی به فرمالدهید، رزین پلیمری تیوسمی کاربازید-فرمالدهید (TSCFR) تشکیل می‌شود [۳۳]. در واکنش میان تیواستامید با فرمالدهید، فقط یک سایت نیتروژن نوکلئوفیلی به شکل تیوکاربامید وجود دارد که زوج ناپیوندی نیتروژن در آن در رزونانس با گروه تیونیل می‌باشد و بنابراین از تراکم بار منفی و قدرت نوکلئوفیلی آن نسبت به فرمالدهید کاهش می‌یابد.

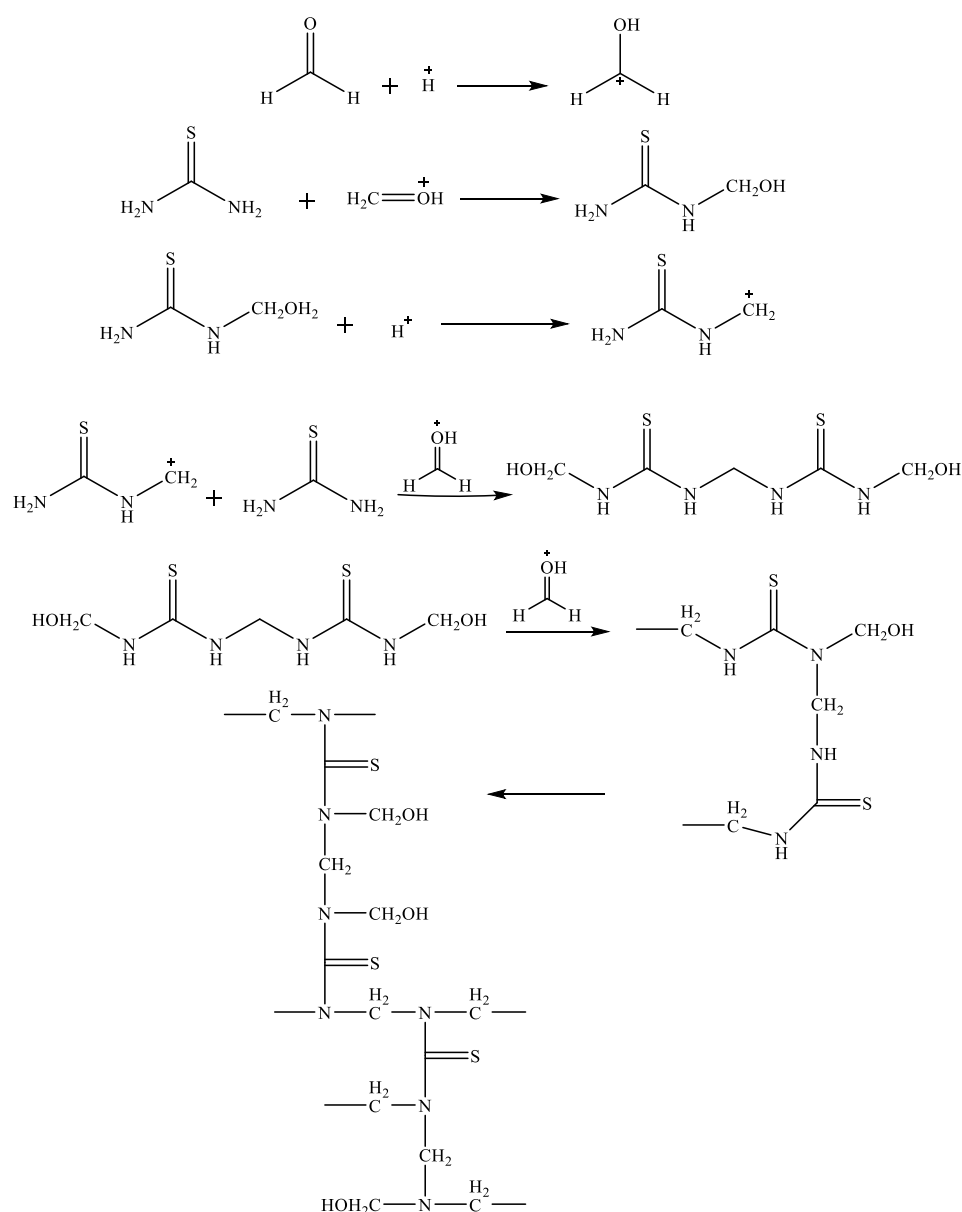
همچنین در شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ماده جاذب، میزان انتشار فرمالدهید نمونه‌ها کاهش می‌یابد، به نحوی که کمترین میزان انتشار فرمالدهید مربوط به نمونه‌های حاوی ۶ درصد ماده جاذب می‌باشد. دلیل این مسئله را می‌توان این گونه بیان کرد که با افزایش مقدار ماده جاذب، سایت‌های نیتروژن نوکلئوفیل حمله‌کننده به مولکول‌های فرمالدهید نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه از آزادسازی حجم بیشتری از فرمالدهید ممانعت به عمل خواهد آمد [۱۷]. با افزایش مقدار تیوسمی کاربازید از ۲ به ۶ درصد وزنی در تخته خرده چوب، میزان انتشار فرمالدهید از ۰/۵۸ به ۰/۴۲ میلی گرم در لیتر کاهش یافت. روند مشابهی برای تیواوره (از ۰/۶۰ به ۰/۴۶ میلی گرم در لیتر) و تیواستامید (از ۰/۶۴ به ۰/۴۹ میلی گرم در لیتر) مشاهده شد. نتایج بیانگر آن است که مقادیر فرمالدهید آزاد شده از تخته خرده چوب در تمام تیمارهای مورد مطالعه، الزامات فنی درجه E_1 (حداکثر ۱/۵ میلی گرم در لیتر) مشخص شده در استاندارد JIS A 5908 [۳۳]، را برآورده کرد. همچنین تخته خرده چوب‌های حاوی ۶ درصد وزنی از سه جاذب، الزامات درجه E_0 (حداکثر ۰/۵ میلی گرم در لیتر) در استاندارد JIS A 5908 را برآورده کردند [۳۴].

۳-۳. خواص مکانیکی

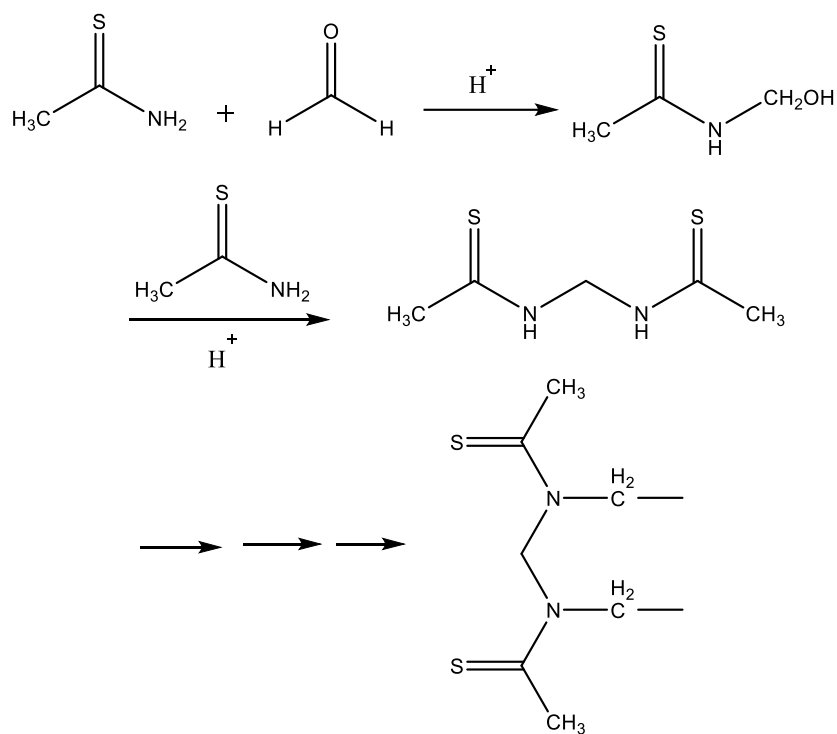
۳-۳-۱. استحکام خمشی

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته تخته خرده چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۳). در شکل‌های ۷ و ۸، اثر نوع و مقدار مواد جاذب بر استحکام خمشی نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود استحکام مکانیکی نمونه‌ها، با افزودن ماده جاذب کاهش می‌یابد. دلیل این مسئله را می‌توان این گونه بیان کرد که اتصال عرضی شبکه رزین به واسطه افزودن مواد جاذب شیمیایی دارای گروه

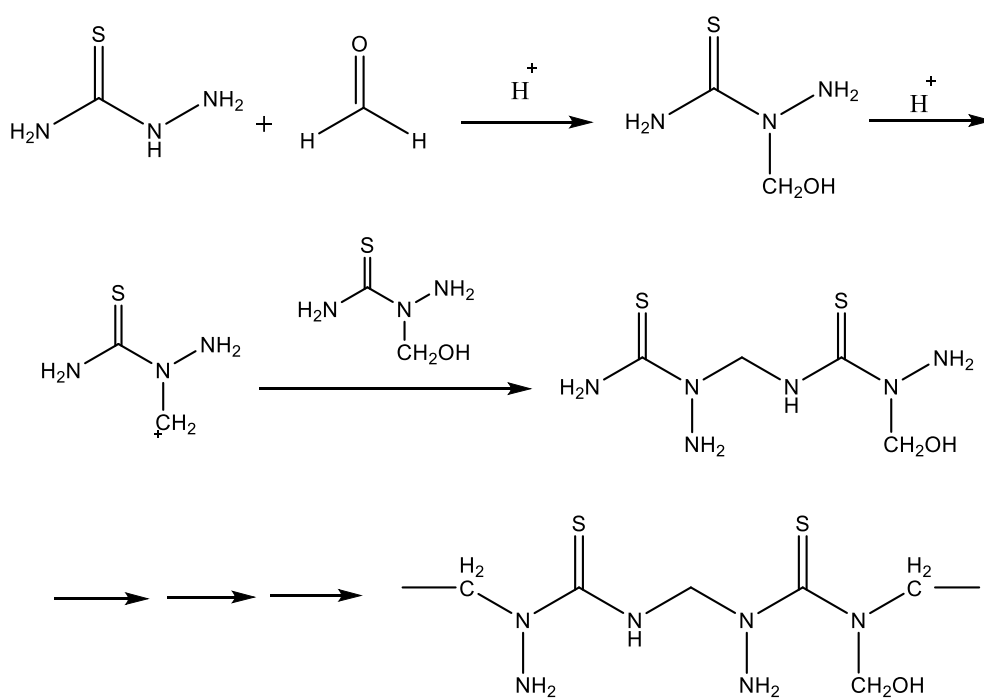
عاملی تیوکاربامید از طریق مجاورت گروه‌های آمین‌دار با گروه تیونیل، دچار اختلال شده است و در نتیجه کیفیت اتصال بین ذرات خرده چوب و رزین کاهش یافته است و باعث کاهش استحکام مکانیکی نمونه‌ها شده است [۱۱-۱۰، ۱۷ و ۲۳]. از طرف دیگر، کاهش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها را می‌توان به پیش مصرف فرمالدهید توسط آمین‌های پراکنده شده در شبکه رزین نسبت داد [۱۲ و ۱۷]. به عبارت دیگر، کاهش مقدار فرمالدهید آزاد در شبکه رزین اوره فرمالدهید، کاهش درجه اتصال عرضی رزین و افت استحکام مکانیکی را به همراه دارد. بیشترین مقدار استحکام مکانیکی تخته خرده چوب به ترتیب در نمونه‌های شاهد (فاقد ماده جاذب)، تیواستامید، تیواوره، و تیوسمی کاربازید مشاهده شد. مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته با افزایش مقدار ماده جاذب تا ۶ درصد وزنی، برای تخته‌های حاوی تیواستامید به ترتیب برابر ۱۵/۴۶ و ۱۸۳۱/۲۴ مگاپاسگال، تیواوره (۱۴/۳۸ و ۱۷۵۹/۴۷ مگاپاسگال)، و تیوسمی کاربازید (۱۳/۶۱ و ۱۷۱۷/۸۳ مگاپاسگال) گزارش شد. نتایج نشان داد، مقادیر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در تمام تیمارهای مورد مطالعه، الزامات فنی (حداقل به ترتیب برابر ۱۱ و ۱۶۰۰ مگاپاسگال) ذکر شده در استاندارد EN 312 [۳۴]، برای تخته خرده چوب جهت استفاده در داخل ساختمان و شرایط خشک (P_2) را برآورده کرده‌اند [۳۵].



شکل ۴. مکانیسم پیشنهادی تشکیل رزین تیواوره-فرمالدهید (TUFR)



شکل ۵. مکانیسم پیشنهادی تشکیل رزین تیواستامید- فرمالدهید (TAFR)

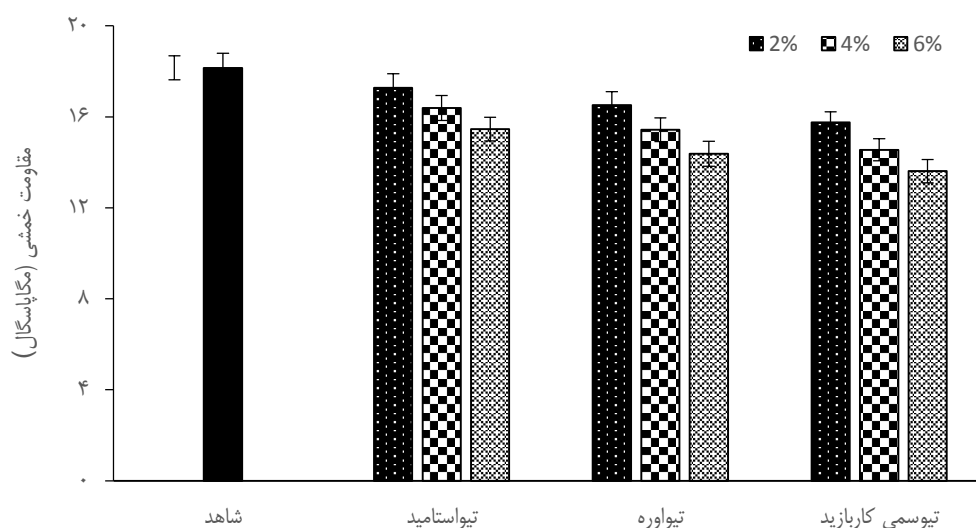


شکل ۶. مکانیسم پیشنهادی تشکیل رزین تیوسمی کاربازید- فرمالدهید (TSCFR)

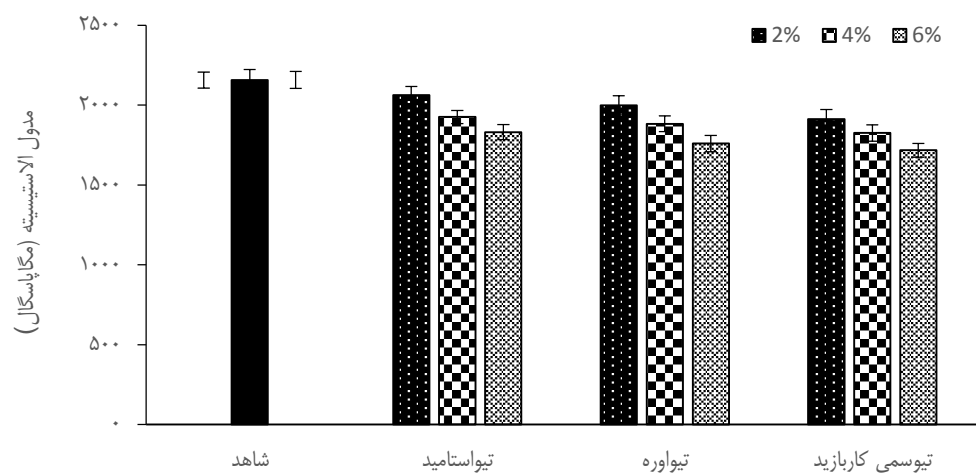
جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر استحکام خمشی تخته خرده چوب

ویژگی	منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی داری
مقاومت خمشی	نوع ماده جاذب	۶۱/۴۷۷	۳	۲۰/۴۹۲	$2/732 \times 10^5$	۰/۰۰۰**
	مقدار ماده جاذب	۱۴/۰۰۹	۲	۷/۰۰۴	$9/339 \times 10^4$	۰/۰۰۰**
	نوع $\times$ مقدار ماده جاذب	۴/۸۰۱	۶	۰/۸۰۰	$1/067 \times 10^4$	۰/۰۰۰**
	خطا	۰/۰۰۲	۲۴	$7/1 \times 10^{-5}$		
	کل	۸۰/۲۸۹	۳۵			
مدول الاستیسیته	نوع ماده جاذب	۵۸۵۹۲۴/۱۶۲	۳	۱۹۵۳۰۸/۰۵۴	$2/604 \times 10^9$	۰/۰۰۰**
	مقدار ماده جاذب	۱۶۶۱۱۶/۸۷۸	۲	۸۳۰۵۸/۴۳۹	$1/107 \times 10^9$	۰/۰۰۰**
	نوع $\times$ مقدار ماده جاذب	۵۸۱۳۴/۶۷۵	۶	۹۶۸۹/۱۱۲	$1/292 \times 10^8$	۰/۰۰۰**
	خطا	۰/۰۰۲	۲۴	$7/5 \times 10^{-5}$		
	کل	۸۱۰۱۷۵/۷۱۷	۳۵			

** - معنی دار در سطح ۱ درصد



شکل ۷. تأثیر نوع و مقدار مواد جاذب بر مقاومت خمشی تخته خرده چوب



شکل ۸. تأثیر نوع و مقدار مواد جاذب بر مدول الاستیسیته تخته خرده چوب

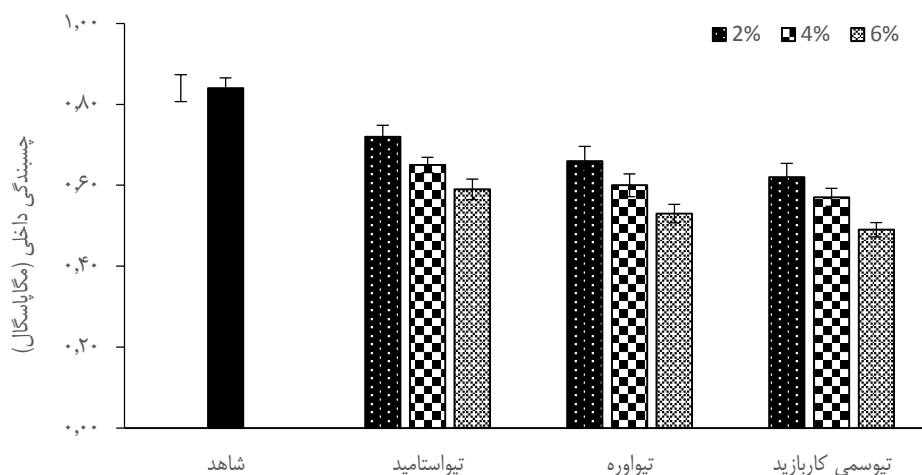
۳-۳-۲. چسبندگی داخلی

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر میزان چسبندگی داخلی تخته خرده چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۴). در شکل ۹، اثر نوع و مقدار مواد جاذب بر میزان چسبندگی داخلی نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چسبندگی داخلی نمونه‌ها با افزودن ماده جاذب کاهش می‌یابد، و این روند با افزایش مقدار ماده جاذب، تشدید می‌شود. چسبندگی داخلی، فاکتور بسیار مهمی در تخته خرده چوب محسوب می‌شود که به تراکم اتصال عرضی شبکه رزین بستگی دارد [۱۰-۱۱، ۱۶ و ۲۲]. در نتیجه اختلال در ساختار شبکه رزین و کاهش باندهای اتصال به واسطه افزودن ترکیبات دارای گروه عاملی تیوکاربامید ($H_2N-C=S$)، موجب کاهش چسبندگی داخلی نمونه‌ها می‌گردد. با افزایش مقدار تیواستامید از ۲ به ۶ درصد وزنی در تخته خرده چوب، چسبندگی داخلی از ۰/۷۲ به ۰/۵۹ مگاپاسکال کاهش یافت. روند مشابهی برای تیواوره (از ۰/۶۶ به ۰/۵۳ مگاپاسکال) و تیوسمی کاربازید (از ۰/۶۲ به ۰/۴۸ مگاپاسکال) مشاهده شد. نتایج حاکی آن است که مقادیر چسبندگی داخلی در تمام تیمارهای مورد مطالعه، الزامات فنی (حداقل ۳/۵ مگاپاسکال) مشخص شده در استاندارد EN 312 برای تخته خرده چوب جهت استفاده در داخل ساختمان و شرایط خشک (P_2) را برآورده کردند [۳۵].

جدول ۴. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر میزان چسبندگی داخلی تخته خرده چوب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
نوع ماده جاذب	۰/۴۱۷	۳	۰/۱۳۹	$1/855 \times 10^{-3}$	۰/۰۰۰**
مقدار ماده جاذب	۰/۰۵۷	۲	۰/۰۲۹	۳۸۲/۳۳۳	۰/۰۰۰**
نوع $\times$ مقدار ماده جاذب	۰/۰۱۹	۶	۰/۰۰۳	۴۲/۷۷۸	۰/۰۰۰**
خطا	۰/۰۰۲	۲۴	$7/5 \times 10^{-5}$		
کل	۰/۴۹۶	۳۵			

** - معنی‌دار در سطح ۱ درصد



شکل ۹. تأثیر نوع و مقدار مواد جاذب بر چسبندگی داخلی تخته خرده چوب

۳-۴. خواص فیزیکی

۳-۴-۱. جذب آب و واكشیدگی ضخامت

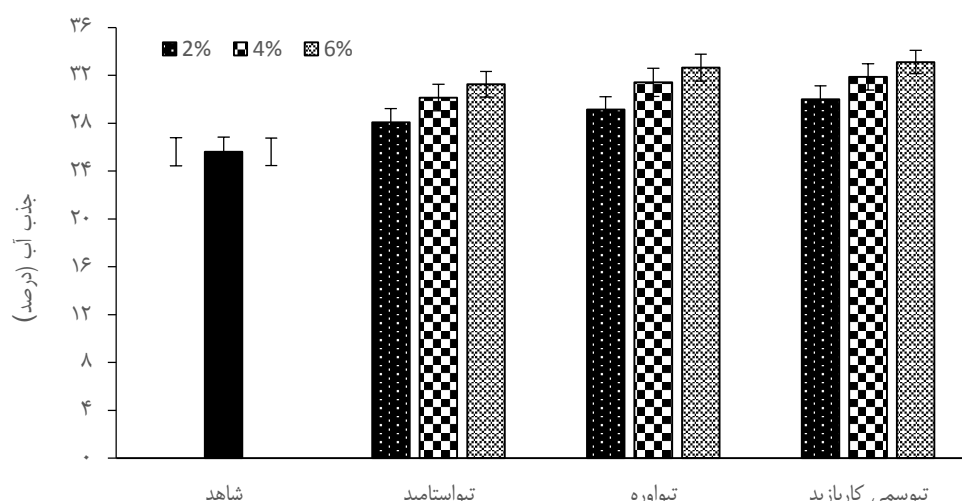
نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر جذب آب و واكشیدگی ضخامت تخته خرده چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۵). در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، اثر نوع و مقدار مواد جاذب بر خواص فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جذب آب و میزان واكشیدگی ضخامت نمونه‌ها

با افزودن ماده جاذب افزایش می‌یابد، و این روند با افزایش مقدار ماده جاذب، شدت پیدا می‌کند. از آنجا که جذب آب و واکنشیدگی ضخامت تخته خرده چوب به پارامتر چسبندگی داخلی و کیفیت اتصال بین چسب و ذرات خرده چوب وابسته است [۱۰-۱۱، ۱۶ و ۲۲]، بنابراین می‌توان انتظار داشت با افزودن ماده جاذب، اتصال عرضی شبکه رزین دچار اختلال شده و به تبع آن کیفیت پیوند بین ذرات خرده چوب کاهش یابد، در نتیجه جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها افزایش یابد. یافته‌های پژوهش Ghani و همکاران (۲۰۱۸)، Kord و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد بهبود مقاومت چسبندگی داخلی به‌طور مستقیم با پایداری ابعادی پانل‌های چوبی مرتبط است، زیرا خط پیوند بهتر بین ذرات چوب، آنها را محکم نگه می‌دارد و واکنشیدگی ضخامت و جذب آب کمتری ایجاد می‌کند. بیشترین مقدار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت به‌ترتیب در نمونه‌های شاهد (فاقد ماده جاذب)، تیواستامید، تیواوره، و تیوسمی کاربازید، تیواوره، تیواستامید، و شاهد (فاقد ماده جاذب) مشاهده شد. از طرفی، مقدار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت با افزایش مقدار ماده جاذب تا ۶ درصد وزنی، برای تخته‌های حاوی تیواستامید به‌ترتیب برابر ۳۱/۲۷ و ۱۱/۸۴ درصد، تیواوره (۳۲/۶۷ و ۱۲/۱۹ درصد)، و تیوسمی کاربازید (۳۳/۱۲ و ۱۲/۶۸ درصد) گزارش شد. نتایج نشان داد مقدار واکنشیدگی ضخامت در تمام تیمارهای مورد مطالعه، الزامات فنی (حداکثر ۱۴ درصد) مشخص شده در استاندارد EN 312 برای تخته خرده چوب جهت استفاده برای مصارف غیربرابر در شرایط مرطوب (P_3) را برآورده کردند [۳۵].

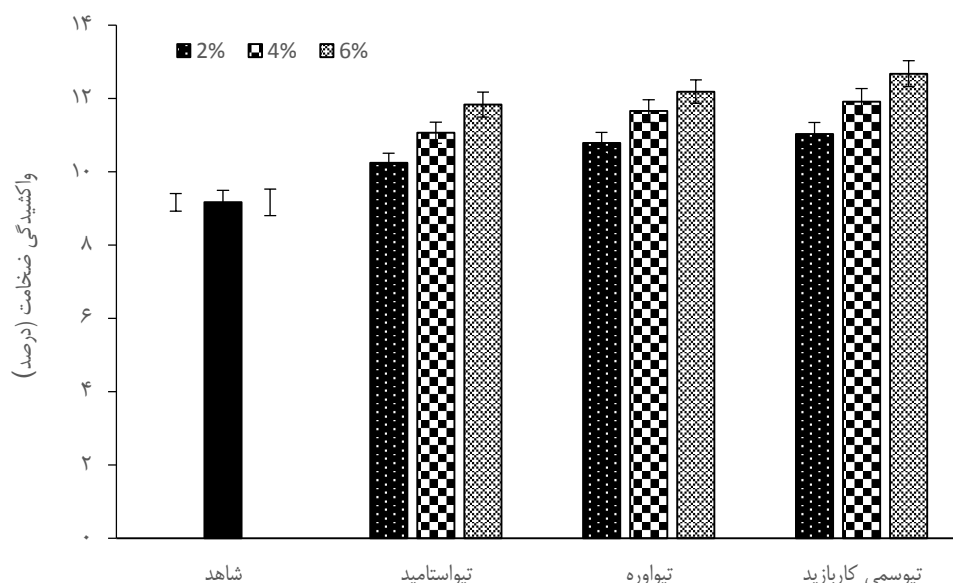
جدول ۵. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار ماده جاذب بر خواص فیزیکی تخته خرده چوب

ویژگی	منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
جذب آب	نوع ماده جاذب	۲۰۰/۹۵۱	۳	۶۶/۹۸۴	$۸/۹۳۱ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۰**
	مقدار ماده جاذب	۳۶/۸۷۳	۲	۱۸/۴۳۷	$۲/۴۵۸ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۰**
	نوع $\times$ مقدار ماده جاذب	۱۲/۴۸۴	۶	۲/۰۸۱	$۲/۷۷۴ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۰۰۰**
	خطا	۰/۰۰۲	۲۴	$۷/۵ \times ۱۰^{-۵}$		
	کل	۲۵۰/۳۱۰	۳۵			
واکنشیدگی ضخامت	نوع ماده جاذب	۳۹/۴۹۱	۳	۱۳/۱۶۴	$۱/۷۵۵ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۰**
	مقدار ماده جاذب	۸/۱۰۷	۲	۴/۰۵۴	$۵/۴۰۵ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۰۰۰**
	نوع $\times$ مقدار ماده جاذب	۲/۷۷۶	۶	۰/۴۶۳	$۶/۱۶۹ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۰۰۰**
	خطا	۰/۰۰۲	۲۴	$۷/۵ \times ۱۰^{-۵}$		
	کل	۵۰/۳۷۷	۳۵			

** - معنی‌دار در سطح ۱ درصد



شکل ۱۰. تأثیر نوع و مقدار مواد جاذب بر جذب آب تخته خرده چوب



شکل ۱۱. تأثیر نوع و مقدار مواد جاذب بر واکنش‌دهی ضخامت تخته خرده چوب

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، پتانسیل استفاده از برخی افزودنی‌های جدید بر پایه ترکیبات دارای گروه عاملی تیوکاربامید، به‌عنوان جاذب فرمالدهید در تولید تخته خرده چوب، مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، سه جاذب مختلف دارای گروه عاملی تیوکاربامید، به نام‌های تیواوره، تیواستامید، و تیوسمی کاربازید در سطوح بارگذاری ۲، ۴ و ۶ درصد (وزنی) براساس وزن خشک رزین، به اوره فرمالدهید اضافه شدند. سرانجام خواص فیزیکی، مکانیکی و مقدار فرمالدهید آزاد شده از تخته‌های دارای مواد جاذب با تخته‌های فاقد این ترکیبات نمونه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. همچنین به‌منظور مطالعه تأثیر گروه‌های عاملی ماده جاذب بر فرمالدهید، از طیف‌سنج مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. نتایج نشان داد، مقدار فرمالدهید آزاد شده از پانل‌های تخته خرده چوب با افزودن مقدار ماده جاذب به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. کمترین میزان انتشار فرمالدهید به‌ترتیب در نمونه‌های حاوی تیوسمی کاربازید (۰/۴۲ میلی گرم در لیتر)، و پس از آن در تیواوره (۰/۴۶ میلی گرم در لیتر) و تیواستامید (۰/۴۹ میلی گرم در لیتر) در سطح بارگذاری ۶ درصد مشاهده شد. مقدار فرمالدهید آزاد شده از نمونه‌های شاهد معادل ۰/۷۱ میلی گرم در لیتر گزارش شد. یافته‌های حاصل از ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی نشان داد استحکام مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی نمونه‌ها با افزودن ماده جاذب کاهش می‌یابد، در حالی که جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت افزایش می‌یابد. با استناد به نتایج به‌دست آمده، می‌توان گفت استفاده از پانل‌های تخته خرده چوب در تمام تیمارهای مورد مطالعه برای مصارف داخل ساختمان و شرایط خشک (P_2)، مطابق الزامات فنی تعریف شده در استاندارد EN 312 می‌باشد. با این وجود توصیه می‌شود پیش از استفاده از این ترکیبات برای مصارف داخل ساختمان (مبل‌مان منزل و سرویس اتاق کودک)، میزان سمیت آنها نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین به‌منظور بررسی و شناخت دقیق‌تر نقش ماده جاذب در شبکه رزین اوره فرمالدهید، پیشنهاد می‌شود رزین پخت شده نیز مورد آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) قرار گیرد. اگرچه مشاهدات میکروسکوپی (SEM) نیز می‌تواند به مطالعه بهتر شبکه رزین کمک شایانی نماید.

۵. منابع

- [1] Heiko Thoemen, H., Mark Irle, M. & Sernek, M. (2010). Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists, Brunel University Press, London, England.
- [2] Powney, S. (2025). European wood-based panels production output increased by 1.9% in 2024, according to provisional statistics released by the European Panel Federation (EPF).

- [3] Dunky, M. (1998). Urea-formaldehyde (UF) adhesive resins for wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(2), 95-107.
- [4] Conner, A.H. (2001). Wood: Adhesives, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier Science Ltd, New York.
- [5] Deng, S., Du, G., Li, X. & Pizzi A. (2014). Performance and reaction mechanism of zero formaldehyde-emission urea-glyoxal (UG) resin, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(4), 2029-2038.
- [6] Ryu, D.Y., Shimohara, T., Nakabayashi, K., Miyawaki, J., Park, J. & Yoon, S.H. (2019). Urea/nitric acid co-impregnated pitch-based activated carbon fiber for the effective removal of formaldehyde. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 80(3), 98-105.
- [7] Nemli, G. & Öztürk, I. (2006). Influences of some factors on the formaldehyde content of particleboard. *Building and Environment*, 41(6), 770-774.
- [8] Ayırmis, N., Lee, Y. K., Kwon, J.H., Han, T.H. & Kim, H.J. (2016). Formaldehyde emission and VOCs from LVLs produced with three grades of urea-formaldehyde resin modified with nanocellulose. *Building and Environment*, 97(2), 82-87.
- [9] IARC. (2012). Chemical agents and related occupations: A review of human carcinogens monographs on the evaluation of the carcinogenic risks to humans, Lyon, France.
- [10] Sensogut, C., Murat-Ozalp, M. & Yesil, H. (2009). The effect of borax pentahydrate addition to urea formaldehyde on the mechanical characteristics and free formaldehyde content of plywood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(5), 589-592.
- [11] Costa, N. A., Pereira, J., Ferra, J., Cruz, P., Martins, J., Magalhaes, F.D., Mendes, A. & Carvalho, L. H. (2013). Scavengers for achieving zero formaldehyde emission of wood-based panels. *Wood Science and Technology*, 47(3), 1261-1272.
- [12] Ibrahimnejad, A. (2015). Effect of TiO₂ nanoparticles on the formaldehyde emission, physical and mechanical properties of MDF. Master of Science Thesis, University of Tehran. (In Persian)
- [13] Younesi Kordkheili, H., Kazemi Najafi, S. & Behrooz, R. (2016). Influence of nanoclay on physiochemical, thermal and structural properties of urea formaldehyde resin. *Journal of Forest and Wood Products*, 69(3), 561-570. (In Persian)
- [14] Dentinho, I.V. (2017). Formaldehyde-scavenging nanoparticles for high performance resins. *Instituto Superior Técnico*, 3(1), 1-19.
- [15] Ghania, A., Ashaaria, Z., Bawona, P. & Lee, S.H. (2018). Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. *Building and Environment*, 142(6), 188-194.
- [16] Shalbahfan, A., Hassannejad, H. & Rahmaninia, M. (2020). Formaldehyde adsorption capacity of chitosan derivatives as bio-adsorbents for wood-based panels. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102(11), 102669-102677.
- [17] Kord, B., Movahedi, F., Adlnasab, L. & Ayırmis, A. (2022). Effect of novel scavengers based on phenolic compounds on formaldehyde emission and physical-mechanical properties of particleboard. *Wood Material Science and Engineering*, 17(6), 954-964.
- [18] Eom, Y.G., Kim, J.S., Kim, S., Kim, J.A. & Kim, H.J. (2006). Reduction of formaldehyde emission from particleboards by bio-scavengers. *Mokchae Konghak*, 34(5), 29-41.
- [19] Buyuksari, U., Ayırmis, N., Avci, E., & Koc, E. (2010). Evaluation of the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard manufactured from waste stone pine (*Pinus pinea* L.) cones. *Bioresource Technology*, 101(1), 255-259.
- [20] Migneault, S., Koubaa, A., Riedl, B., Nadji, H., Deng, J. & Zhang, S. (2011). Potential of pulp and paper sludge as a formaldehyde scavenger agent in MDF resins. *Holzforschung*, 65(3), 403-409.
- [21] Ayırmis, N. & Kaymakci, A. (2012). Reduction of formaldehyde emission from light MDF panels by adding chestnut shell flour. *Holzforschung*, 66(4), 443-446.
- [22] Boran, S., Usta, M., Ondaral, S. & Gümüşkaya, E. (2012). The efficiency of tannin as a formaldehyde scavenger chemical in medium density fiberboard. *Composites: Part B*, 43(5), 2487-2491.

- [23] Moubarik, A., Mansouri, H.R., Pizzi, A., Allal, A., Charrier, F., Badia, M.A. & Charrier, B. (2013). Evaluation of mechanical and physical properties of industrial particleboard bonded with a corn flour–urea formaldehyde adhesive. *Composites: Part B*, 44(1), 48-51.
- [24] Kordkheili, H.Y., Pizzi, A. & Niyatzade, G. (2016). Reduction of formaldehyde emission from particleboard by phenolated kraft lignin. *Journal of Adhesive*, 92(6), 485-497
- [25] Kumar, A., Gupta, A., Sharma, K.V., Nasir, M. & Ahmad khan, T. (2013). Influence of activated charcoal as filler on the properties of wood composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 46(1), 34-39.
- [26] Taghiyari, H.R., Hosseini, S.B., Ghahri, S., Ghofrani, M. & Papadopoulos, A.N. (2020). Formaldehyde emission in micron-sized wollastonite treated plywood bonded with soy flour and urea-formaldehyde resin. *Applied Sciences*, 10, 6709-6723.
- [27] Shalbafan, A. & Thoemen, H. (2020). Geopolymer-bonded laminated veneer lumber as environmentally friendly and formaldehyde-free product: effect of various additives on geopolymer binder features. *Applied Sciences*, 10(2), 593-611.
- [28] Standard Test Method for Wood-based panels, Determination of formaldehyde release, Part 4: Desiccator method, International Standard, ISO 12460-4, 2016.
- [29] Standard Test Method for Particleboards and fibreboards, Determination of swelling in thickness after immersion in water, European Committee for Standardization, EN 317, 1993.
- [30] Standard Test Method for Wood Based Panels, Determination of Modulus of Elasticity in Bending and Bending Strength, European Committee for Standardization, EN 310, 1993.
- [31] Standard Test Method for Particleboards and Fiberboards, Determination of Tensile Strength Perpendicular to the Plane of the Board, European Committee for Standardization, EN 319, 1993.
- [32] Ahamad, T., Kumar V. & Nishat, N. (2006). Synthesis, characterization and antimicrobial activity of transition metal chelated thiourea-formaldehyde resin. *Polymer International*, 55(12), 398-406.
- [33] Parveen, S., Ahamad, T. & Nishat, N. (2008). New anti-bacterial polychelates: synthesis, characterization, and anti-bacterial activities of thiosemicarbazide–formaldehyde resin and its polymer–metal complexes. *Applied Organometallic Chemistry*, 22(2), 70-77.
- [34] Standard Test Method for Particleboards, Japanese Industrial Standard, JIS A 5908, 2003.
- [35] Standard Specifications for Particleboards, European Committee for Standardization, EN 312, 2010.