

آماده انتشار

بررسی تأثیر سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) بر میزان انتشار گاز فرمالدئید و خواص فیزیکی - مکانیکی تخته خرده چوب‌های ساخته شده با رزین اوره فرمالدئید (UF)

چکیده

سابقه و هدف: صنعت تخته خرده چوب به دلیل کاربرد گسترده در ساخت و ساز و دکوراسیون دارای اهمیت است که در آن چسب‌های اوره فرمالدئید به دلیل مقرون به صرفه بودن، به طور رایج استفاده می‌شوند؛ با این حال، انتشار گاز اوره فرمالدئید از این تخته‌ها یک چالش جدی زیست محیطی و بهداشتی محسوب می‌شود که می‌تواند منجر به خطرات در سلامتی و حتی سرطان شود؛ لذا، تحقیقات کنونی بر روی استفاده از افزودنی‌هایی نظیر 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 تخته خرده چوب‌های ساخته شده با رزین اوره فرمالدئید (UF) تولیدی شرکت‌های چسب شیراز و سامد می‌باشد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به بررسی ساخت تخته خرده چوب‌های با استفاده از خرده چوب‌های 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؛ خرده چوب‌های خشک شده با این مواد مخلوط شده و یک خرده چوب (با نسبت ۶۰ به ۴۰ خرده چوب 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 ساخته شده به مدت دو هفته در شرایط استاندارد نگهداری شدند و برای ارزیابی کیفیت، مقاومت و مدول خمشی، چسبندگی داخلی، انتشار فرمالدئید، جذب آب، واکشیدگی 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. سمی‌کاربازید 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 واکشیدگی 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 به طور کلی کمتر بود و با افزودن ۱/۵ گرم سمی‌کاربازید 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 به دست آمد، در حالی که 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 سamed مشهد با ۶ درصد تری‌اتوکسید بود؛ علاوه بر 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 خرده چوب تأیید داشت.

کلمات کلیدی: انتشار گاز فرمالدئید، سمی کاربازید، چسب سamed، چسب شیراز.

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

Background and Objective: The particleboard industry is important due to its wide application in construction and decoration, where urea-formaldehyde adhesives are commonly used due to their cost-effectiveness; however, the emission of urea-formaldehyde gas from these boards is a serious environmental and health challenge that can lead to health hazards and even cancer; therefore, current research has focused on the use of additives such as carbazide and aminopropyltriethoxysilane to reduce this formaldehyde emission from the final products. The aim is to investigate the effect of carbazide, aminopropyltriethoxysilane (APTES) on the formaldehyde emission rate and physical-mechanical properties of particleboard made with urea-formaldehyde (UF) resin produced by Shiraz and Samed Adhesives Companies.

Materials and Methods: This study investigates the manufacture of particleboard using coarse and fine wood chips, Samed Mashhad, Shiraz urea formaldehyde adhesive, hardener, and various amounts of the toxic substance carbazide (1, 1/5 grams) and aminopropyltriethoxide (2, 4, 6 percent); dried wood chips were mixed with these materials and the chip cake (with a ratio of 60 to 40 coarse to fine wood chips) was pressed at 190 degrees Celsius and a certain pressure to produce boards with a density of 0/7 grams per cubic centimeter and a thickness of 16 millimeters; finally, the manufactured boards were stored for two weeks under standard conditions and were subjected to quality evaluation, strength and flexural modulus, internal adhesion, formaldehyde diffusion, water absorption, thickness swelling, and microscopic examinations.

Results: The results showed that the Shiraz control adhesive had better mechanical performance, including its higher flexural strength, internal adhesion, and flexural modulus. Semicarbazide in Shiraz adhesive with 1 g showed the highest flexural strength and with 1/5 g the highest internal adhesion and flexural modulus, and aminopropyltriethoxysilane in Shiraz adhesive with 2% showed the highest flexural strength, internal adhesion, and flexural modulus. The lowest water absorption and thickness swelling (2 and 24 hours) were observed in Shiraz adhesive. Regarding water absorption after 2 hours, Samed Mashhad adhesive with 6% aminopropyltriethoxysilane had the lowest water absorption, but after 24 hours, Shiraz adhesive with the same concentration of 6% showed the lowest water absorption. Formaldehyde emission in Shiraz adhesive was generally lower, and a significant reduction was observed in Shiraz adhesive with the addition of 1/5 g semicarbazide and 2% triethoxide. SEM and FTIR analyses confirmed these results and showed that strong chemical bonds (including C=O, N-H, C-H, and Si-O-Si groups) between the components led to increased adhesion, integrity, and compatibility between the adhesive polymer and wood chips.

Conclusion: The best mechanical properties (highest flexural strength and internal adhesion) were obtained using Shiraz adhesive with 2% aminopropyltriethoxysilane, while the highest flexural modulus

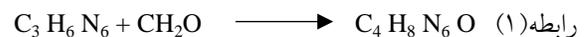
of elasticity was obtained with the Shiraz control adhesive; in terms of water absorption, the lowest value in 2 hours was for Samed Mashhad adhesive with 6% additive and in 24 hours for Shiraz adhesive with 6% additive, and the lowest thickness swelling was observed in Shiraz adhesive with 2% triethoxide; in terms of safety, the lowest formaldehyde gas emission was for Samed Mashhad adhesive with 6% triethoxide; In addition, microscopic (SEM) studies showed that the addition of silane improved adhesion and structural uniformity, and FTIR analysis also confirmed the establishment of effective chemical interactions between the adhesive components and wood chips.

Keywords: Formaldehyde gas emissions, carbazide poisoning, Samed glue, Shiraz glue.

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 می‌باشد (۲). طبق آمار، مقدار چسب رزین اوره فرمالدئید ۹۱ درصد از چسب های پانل های 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 ویژگی های مهمی است که باید در هنگام خرید پانل های چوبی برای مصارف خانگی در نظر گرفت، چرا که فرمالدئید اثر مضر شناخته شده ای بر سلامت انسان دارد (۴).

با توجه به ماهیت خطرناک فرمالدئید، تولیدکنندگان چسب های مبتنی بر فرمالدئید و پانل های چوبی به طور مداوم در جستجوی راهی برای کاهش این انتشار هستند (۵). استفاده از افزودنی‌های شیمیایی به نام جاذب‌کننده‌های فرمالدئید است. متداول ترین مواد پاک‌کننده ترکیبات حاوی آمین مانند اوره، آمونیاک، ملامین و دی سیانیدی‌آمید هستند. همان گونه که در رابطه (۱) ملامین با فرمالدئید واکنش داده و متیلول ملامین را تشکیل می‌دهد، دی سیان دی آمید نیز مطابق با رابطه (۲) با دو مول فرمالدئید واکنش کرده و منجر به تشکیل متیلول دی سیان آمیدها می‌گردد (۶).



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 گرد 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 تحقیقی کم‌شکی و همکاران (۱۴۰۲) به ارزیابی انتشار فرمالدئید تخته فیبرهای دانسیته متوسط ساخته شده با مواد تثبیت‌کننده دوست‌دار محیط‌زیست و الیاف پسمانده ریشه شیرین‌بیان پرداختند. نتایج نشان داد اگر الیاف پسمانده ریشه شیرین‌بیان با الیاف کارخانه

ترکیب شود و چسب اوره فرمالدهید با تثبیت کننده‌های سنتی نوع اول (عصاره میوه بلوط، کات کبود، صمغ بادام کوهی) و نوع دوم (عصاره برگ گردو، آلوم، صمغ کنیرا) اصلاح شود، مقدار انتشار گاز فرمالدهید به میزان بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (۷).

در تحقیقی آصفی هدایت آباد و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی کاهش انتشار گاز فرمالدهید از تخته‌های ساخته شده با رزین اوره فرمالدهید با استفاده از افزودنی اوره پرداختند. نتایج نشان داد کاهش رزین اوره فرمالدهید، سبب کاهش انتشار فرمالدهید از تخته خرده‌چوب می‌شود. مقدار درصد افزودنی اوره در تخته خرده چوب بر کاهش انتشار فرمالدهید از تخته معنی‌دار است و سبب کاهش انتشار فرمالدهید می‌شود. همچنین مقاومت چسبندگی داخلی (بیشتر از حد استاندارد) با افزودن پودر اوره به چسب افزایش یافت. وجود اوره در سطح خرده چوب‌ها، مانع ایجاد اتصالات خوب بین چسب و خرده چوب‌ها می‌شود (۸). همچنین Ghani و همکاران (۲۰۱۸) کاهش انتشار فرمالدهید تخته خرده چوب با پیوند اوره فرمالدهید با افزودن آمین‌ها به عنوان جاذب فرمالدهید پرداختند. به این نتیجه رسیدن که رزین UF حاوی آمین کاملاً پخته شده دارای ثبات حرارتی بالاتری نسبت به رزین UF است. رزین UF حاوی آمین نیز به دلیل pH بالاتر، زمان ژل شدن طولانی تری داشت. با این وجود، هر دو ویژگی فیزیکی و مکانیکی تخته خرده چوب حاصل تأثیر منفی گذاشت. تخته خرده چوب ساخته شده از رزین UF حاوی آمین دارای واکنش‌پذیری و ضخامت و جذب آب بالاتری بود. علاوه بر این، استحکام خمشی کمتر و استحکام داخلی نیز ثبت شد (۹).

استفاده کمتر چسب روی خرده چوب 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 فرمالدهید 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 فرمالدهید در تخته خرده چوب‌های تولیدی شرکت‌های چسب شیراز و سامد می‌باشد. چسب سامد مشهد و شیراز از چسب‌های اوره فرمالدهید 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، اقتصادی ترین گزینه در مقیاس آزمایشگاهی بود، لذا با تضمین حفظ بالاترین کیفیت نتایج، ما را قادر ساخت تا به نقطه بهینه اقتصادی - آزمایشی دست یابیم.

مواد و روش کار

مواد

در این پژوهش استفاده از چسب اوره فرمالدهید 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، تخته سازی انتخاب و مقایسه چسب اوره فرمالدهید از دو شرکت که مشخصات آنها در جدول ۱ می‌باشد خرده چوب‌های 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 $M=111.53g/mol$ ،

ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان شرکت سازنده سیگما الدریچ با مشخصات $M=221.37g/mol$ تهیه و مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱ مشخصات چسب اوره فرمالدئید

Table 1 Urea formaldehyde adhesive specifications

ژل تایم (S)	PH	گرانروی CP	ماده جامد (%)	نوع	شرکت سازنده
Gel Time(S)		Viscosity CP	Solid(%)	Type	Manufacturer
50-70	7.5-8.5	50-90	50-70	مایع Liquid	چسب شیراز Shiraz Glue
50-65	7.5	7.-200	50-60	پودر Powder	چسب سامد Samed Glue Mashhad

روش کار

خرده چوب‌ها با چسب اوره فرمالدئید با غلظت ۵۰ درصد و ۱۰ درصد وزن خشک خرده چوب، 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 کیک خرده چوب به صورت سه لایه با نسبت ۶۰ به ۴۰ خرده چوب‌های درشت و نرمه توسط یک قالب به ابعاد 450×450 میلی‌متر به صورت دستی تشکیل و با استفاده از پرس هیدرولیک آزمایشگاهی مدل RANJBAR- SWP در شرایط ثابت پرس دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و در زمان ۵ دقیقه پرس و در نهایت تخته‌ای با دانسته ۰/۷ گرم بر سانتی متر مکعب و ضخامت ۱۶ میلی‌متر 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 سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد قرار گرفت. برای آزمون مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه مطابق با استاندارد EN310 به ابعاد $40 \times 7/5$ و برای آزمون جذب فرمالدئید مطابق با استاندارد ISO 12460-4 نمونه به ابعاد $150 \times 50 \times 16$ میلی‌متر همچنین برای نمونه جذب آب و واکنشیدگی ضخامت مطابق با استاندارد EN317 ابعاد نمونه $50 \times 50 \times 16$ میلی‌متر 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 میلی‌لیتر 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 میلی‌لیتر محلول نمونه با ۲۵ میلی‌لیتر محلول استیل استون- استات آمونیوم درون بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته، محلول حاصل در حمام آب با دمای 65 ± 2 درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفت. سپس بعد از ۶۰ دقیقه، جذب محلول توسط اسپکتروفتومتر به دست آمد.

اندازه گیری 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 EN317 انجام و در نهایت نتایج به دست آمده به وسیله رابطه (۳) جذب آب و رابطه (۴) واکنشیدگی ضخامت محاسبه شد. برای اندازه گیری مقدار انتشار فرمالدئید تخته خرده چوب مطابق با استاندارد ISO 12460-4 نمونه‌ها را در داخل دسیکاتور اندازه گیری و مقدار فرمالدئید آزاد به وسیله رابطه (۵) محاسبه گردید.

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

$WA(t)$ = مقدار جذب آب در زمان غوطه‌وری (%)؛ $W(t)$ = وزن نمونه در زمان غوطه‌وری مورد نظر (gr)؛ $W(o)$ = وزن خشک نمونه قبل از غوطه‌وری (gr).

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

$TS(t)$ = واکنشیدگی ضخامت در زمان غوطه‌وری (%)؛ $T(t)$ = ضخامت نمونه در زمان غوطه‌وری مورد نظر (mm)؛ $T(o)$ = ضخامت اولیه نمونه‌ها (mm).

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

V_1 = حجم ۰/۱ مولار محلول NaOH برای رزین (میلی لیتر)، V_2 = حجم ۰/۱ مولار محلول NaOH برای بلانک (میلی لیتر)، 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 سانتی متر برش داده و با دستگاه SEM مدل VEGA در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تصاویر تهیه شد.

آنالیز آماری

داده‌های حاصل از آزمون‌ها با نرم افزار SPSS با سطح اطمینان ۹۵ درصد و اختلاف میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن بررسی گردید.

نتایج و بحث

جدول ۲ مقدار F و تجزیه واریانس اختلاف معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد و اثر متغیر مورد بررسی و ویژگی‌های مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی، مدول الاستیسته خمش و جذب آب، واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت تخته خورده چوب ساخته شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مقدار F و اختلاف معنی داری مقاومت مکانیکی و فیزیکی تخته خورده چوب

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

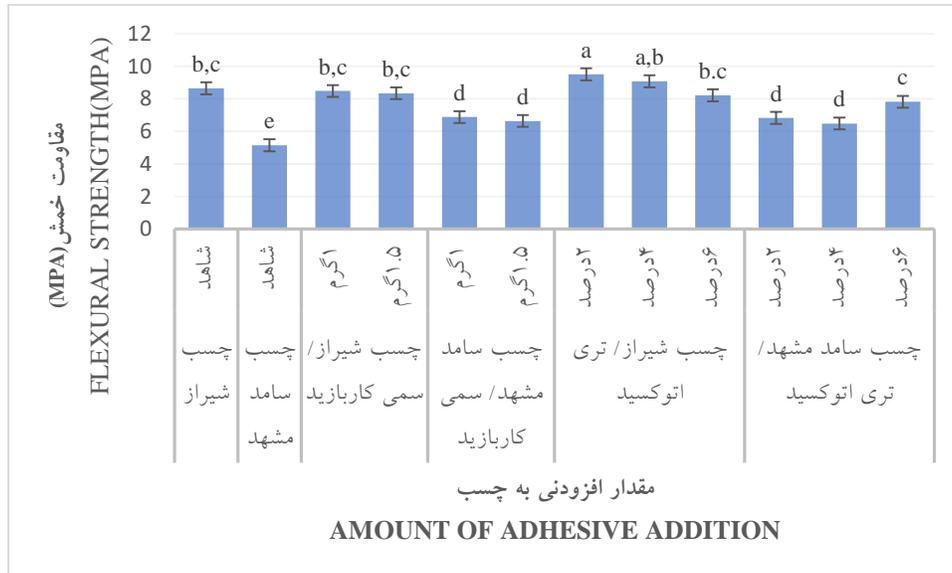
مقاومت خمشی	مدول الاستیسته خمش	چسبندگی داخلی	جذب آب ۲	جذب آب ۲۴	واکنشیدگی
Flexural strength	Flexural modulus of elasticity	Internal adhesion	Water absorption 2 hours	Water absorption 24 hours	واکنشیدگی
			ساعت	ساعت	ضخامت ۲۴
			ساعت	ساعت	ساعت
			Thickness 2 hours	Thickness 24 hours	Thickness 24 hours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

معنی داری در سطح ۹۵ درصد (*)، غیرمعنی داری (n.s)

مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی و مدول الاستیسته خمشی

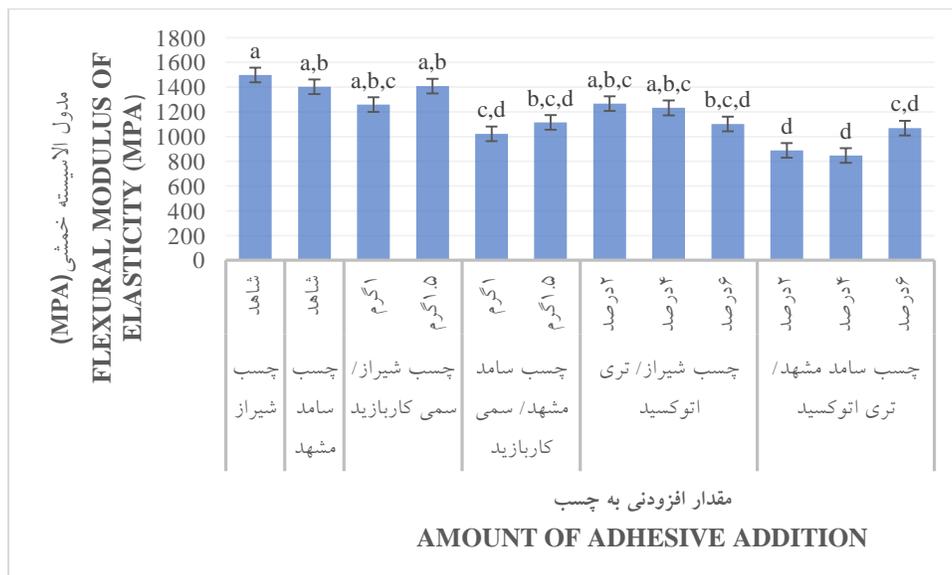
همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از تجزیه واریانس بر ویژگی‌های مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی، مدول الاستیسته خمشی در سطح ۹۵ درصد معنی دار بوده است. همان طور که در شکل ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود چسب شاهد شیراز مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی، مدول الاستیسته خمشی به ترتیب ۶۷/۹۶، ۶۶/۷۸، ۶/۷۶ درصد بیشتر نسبت به چسب شاهد سامد مشهد دارد (۱۰). با افزودن ماده سمی کاربازید به چسب شیراز و چسب سامد بیشترین مقاومت خمشی در چسب شیراز، ۱ گرم سمی کاربازید، بیشترین مقاومت چسبندگی داخلی، مدول الاستیسته خمش چسب شیراز، ۱/۵ گرم ماده سمی کاربازید را دارد. به طور کلی ترکیب‌های شیمیایی برای افزایش پیوند عرضی و تقویت شبکه پلیمری، یک استراتژی شناخته شده برای بهبود استحکام خمشی، چسبندگی داخلی و مدول الاستیسته خمشی در رزین‌های UF است (۱۱). اضافه کردن ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان به چسب سامد مشهد و شیراز بیشترین مدول الاستیسته خمشی، مقاومت چسبندگی داخلی، خمش در چسب شیراز، ۲ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان می‌باشد. 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 بیشترین مقاومت خمشی، ۱۶۹/۷۸ درصد بیشترین چسبندگی داخلی در چسب شیراز، ۲ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان و در مدول الاستیسته خمشی چسب شاهد شیراز ۱۴۹۸/۳۷۳۳ مگا پاسگال مشاهده شد. آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی و فیزیکی تخته خورده چوب ساخته شده با رزین اوره فرمالدئید (UF) تأثیر می‌گذارد، که عمدتاً از طریق نقش آن به عنوان عامل اتصال دهنده و جاذب فرمالدئید است. افزودن APTES به رزین‌های UF برای تولید تخته خورده چوب به دلیل نیاز به افزایش عملکرد چسب و کاهش انتشار فرمالدئید، یک نگرانی مهم زیست محیطی و بهداشتی، صورت می‌گیرد. APTES به عنوان یک عامل اتصال سیلان عمل می‌کند و دارای عملکرد دوگانه‌ای است که به آن اجازه می‌دهد با رزین آلی و اجزای چوب معدنی تعامل داشته باشد. گروه آمینوی آلی-عاملی آن (-NH₂) می‌تواند با رزین آلی UF واکنش دهد، در

حالی که گروه اتوکسی سیلان آن $(\text{Si}(\text{OEt})_3)$ می‌تواند به گروه‌های سیلانول $(\text{SiOH}-)$ هیدرولیز شود و سپس با گروه‌های 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 می‌بخشد و منجر به افزایش استحکام می‌شود.



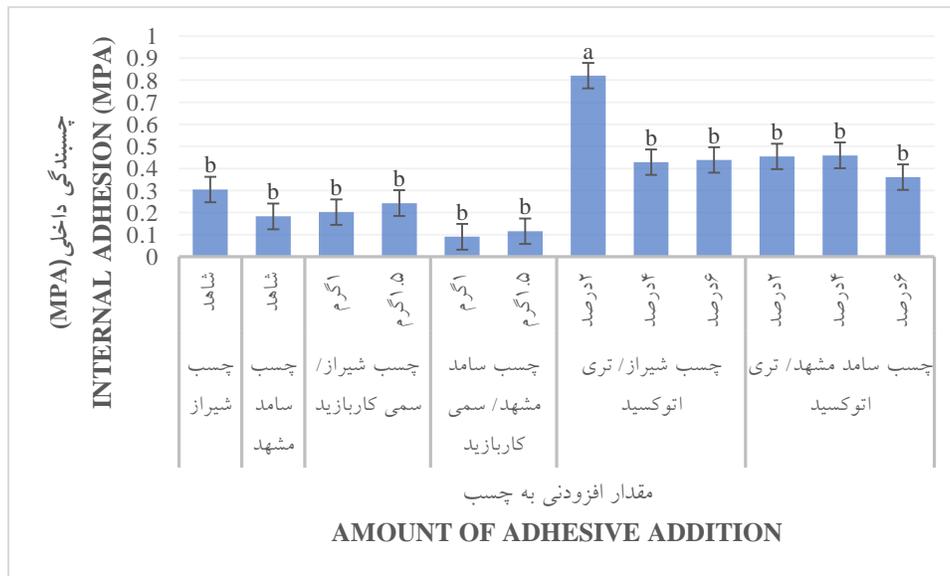
شکل ۱ مقاومت خمشی تخته خرده چوب

Figure 1 Flexural strength of particleboard



شکل ۲ مدول الاستیسته خمشی تخته خرده چوب

Figure 2 Flexural elastic modulus of particleboard



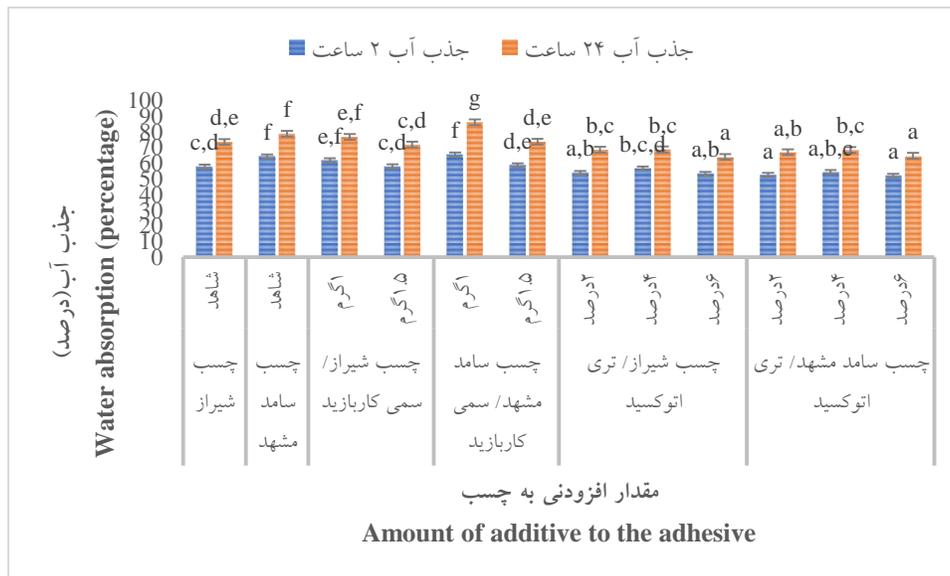
شکل ۳ مقاومت چسبندگی داخلی تخته خرده چوب

Figure 3 Internal adhesion strength of particleboard

جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت

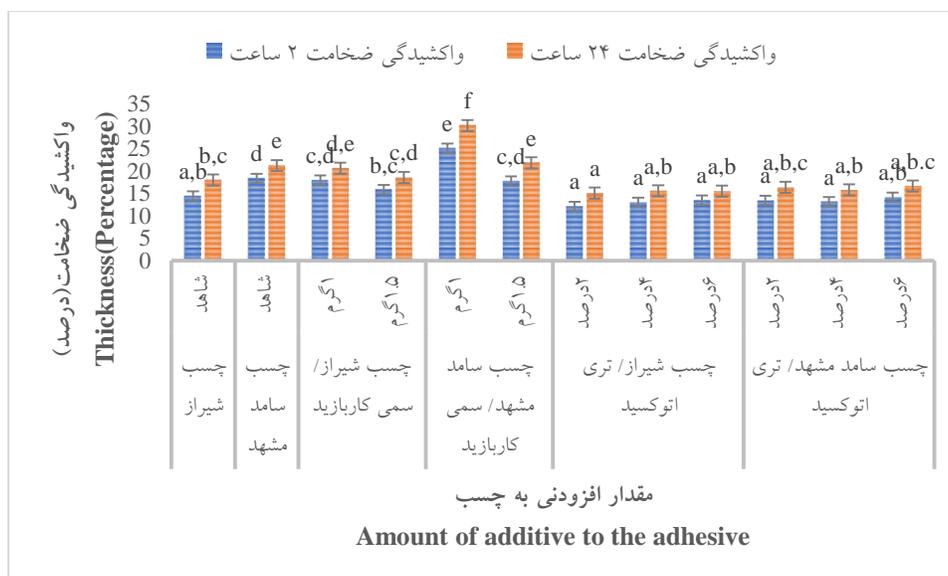
همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از تجزیه واریانس بر ویژگی‌های جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت در سطح ۹۵ درصد معنی دار بوده است. همان طور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود چسب شیراز جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۱۱/۲۹، ۷، ۲۶/۹۵، ۱۷/۹۳ درصد کمتری نسبت به چسب سامد دارد (۱۰). 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 می‌باشد. احتمالاً سمی کاربازید اتصال عرضی چگالی و استحکام چسب را افزایش می‌دهد و یک مانع پایدارتر و کمتر نفوذپذیر در برابر مولکول‌های آب تشکیل می‌دهد. این شبکه تقویت‌شده، حرکت آب به داخل ساختار تخته خرده چوب را محدود می‌کند و در نتیجه هم جذب آب و هم واکنشیدگی ضخامت بعدی را که هنگام جذب آب توسط ذرات چوب رخ می‌دهد، کاهش می‌دهد. همچنین افزایش شبکه پلیمری و بهبود مقاومت در برابر آب، منجر به کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در تخته خرده چوب شود (۱۳). همچنین 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 می‌باشد. 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 واکنش پذیری ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت چسب شیراز، ۲ درصد ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان مشاهده شد. فراتر از بهبودهای مکانیکی، APTES همچنین بر خواص فیزیکی تخته خرده چوب، به ویژه 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 واکنش‌پذیری 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 طولانی مدت و کاربرد تخته خرده چوب در محیط‌های مختلف بسیار مهم است (۱۵). مکانیسمی که تری‌اتوکسید از طریق آن واکنش‌پذیری را کاهش می‌دهد شامل چندین عامل است. اولاً، عوامل اتصال سیلان، یک شبکه قوی‌تر و از نظر شیمیایی به هم پیوسته‌تر را در خود چسب و در سطح مشترک با الیاف چوب ایجاد می‌کنند. 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 تخته خرده چوب 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 تشکیل شده توسط تری‌اتوکسید در کاهش ریزحفره‌ها در ساختار تخته خرده چوب 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).



شکل ۴ جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت تخته خرده چوب

Figure 4 Water absorption of 2 and 24 hours of particleboard



شکل ۵ واکنش پذیری ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت تخته خرده چوب

Figure 5 Thickness swelling 2 and 24 hours of particleboard

انتشار گاز فرمالدئید

طبق جدول ۲ استفاده از چسب اوره فرمالدئید سامد مشهد، شیراز و برای کاهش انتشار گاز فرمالدئید از افزودن سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسید در تخته‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار است. گروه بندی دانکن مقادیر میانگین‌ها را در ۶ گروه قرار داد. شکل ۶ نشان داد که چسب شاهد شیراز انتشار فرمالدئید ۱۷/۷۵ درصد کمتری 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 کمتر بوده همچنین اضافه کردن آمینو پروپیل تری اتوکسید در چسب سامد مشهد و شیراز انتشار گاز فرمالدئید در چسب شیراز ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسید کمتر است. اما در مجموع با افزودن سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسید، در چسب سامد مشهد و شیراز ۲۳۱/۱ درصد کمترین انتشار گاز فرمالدئید ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسید در چسب شیراز (۰/۷۴ میلی گرم بر لیتر) می‌باشد. که با کاهش مصرف چسب اوره فرمالدئید به تخته خرده چوب، انتشار گاز فرمالدئید کاهش می‌یابد (۸).

یکی از مکانیسم‌های اصلی که آمینو پروپیل تری اتوکسید سیلان از طریق آن انتشار فرمالدئید را کاهش می‌دهد، شامل واکنش گروه‌های 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 افزودنی‌ها به عنوان جذب‌کننده‌های فرمالدئید عمل کرده و با مولکول‌های فرمالدئید آزاد که در غیر این صورت به محیط منتشر می‌شوند، واکنش نشان می‌دهند. این جاذب‌ها معمولاً حاوی گروه‌های عاملی هستند که می‌توانند با فرمالدئید ترکیبات پایدار تشکیل دهند. تری‌اتیلن‌ترامین با گروه‌های آمینه متعدد خود، به طور مؤثر فرمالدئید را جذب می‌کند و انتشار آن را از تخته سه لا هنگام ترکیب با رزین‌های UF کاهش می‌دهد. افزودنی‌ها می‌توانند راندمان پخت و میزان پیوند عرضی در ماتریس چسب را بهبود بخشند. یک شبکه پلیمری با پخت کامل‌تر و پیوند عرضی متراکم‌تر، فرمالدئید را به طور مؤثرتری به

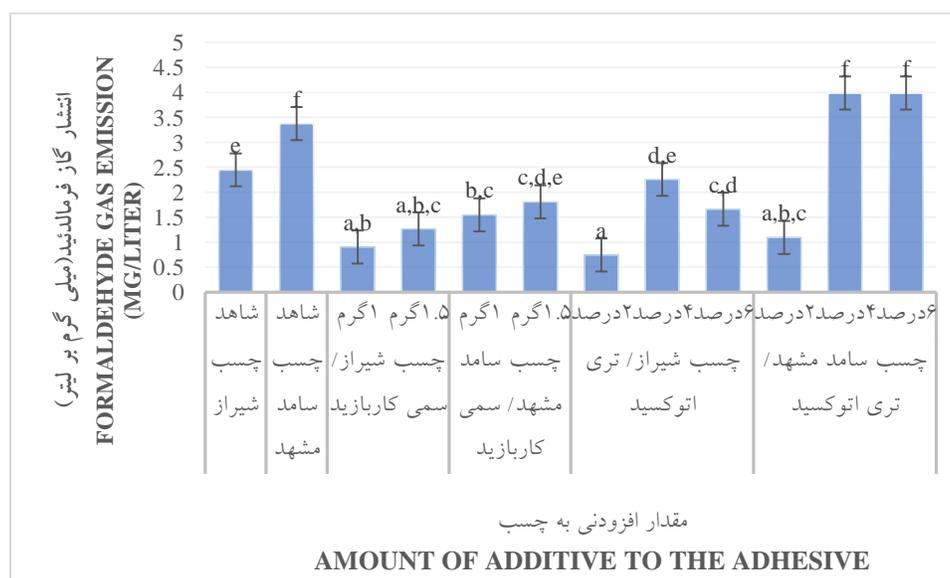
دام می‌اندازد و آزادسازی آن را کاهش می‌دهد. تری‌اتوکسید، که به طور بالقوه به عنوان یک مونومر یا عامل پیوند عرضی عمل می‌کند، می‌تواند در ساختار رزین ادغام شود و در نتیجه خواص شیمیایی و فیزیکی آن را تغییر دهد تا تولید یا آزادسازی فرمالدئید را کاهش دهد. (۲۱).

جدول ۲ تجزیه واریانس تأثیر سمی کاربازید، آمینو پروپیل تری اتوکسید، بر انتشار گاز فرمالدئید در تخته خرده چوب

Table 2 Analysis of variance of the toxic effect of carbazide, aminopropyltriethoxide, on formaldehyde gas emission in particleboard

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

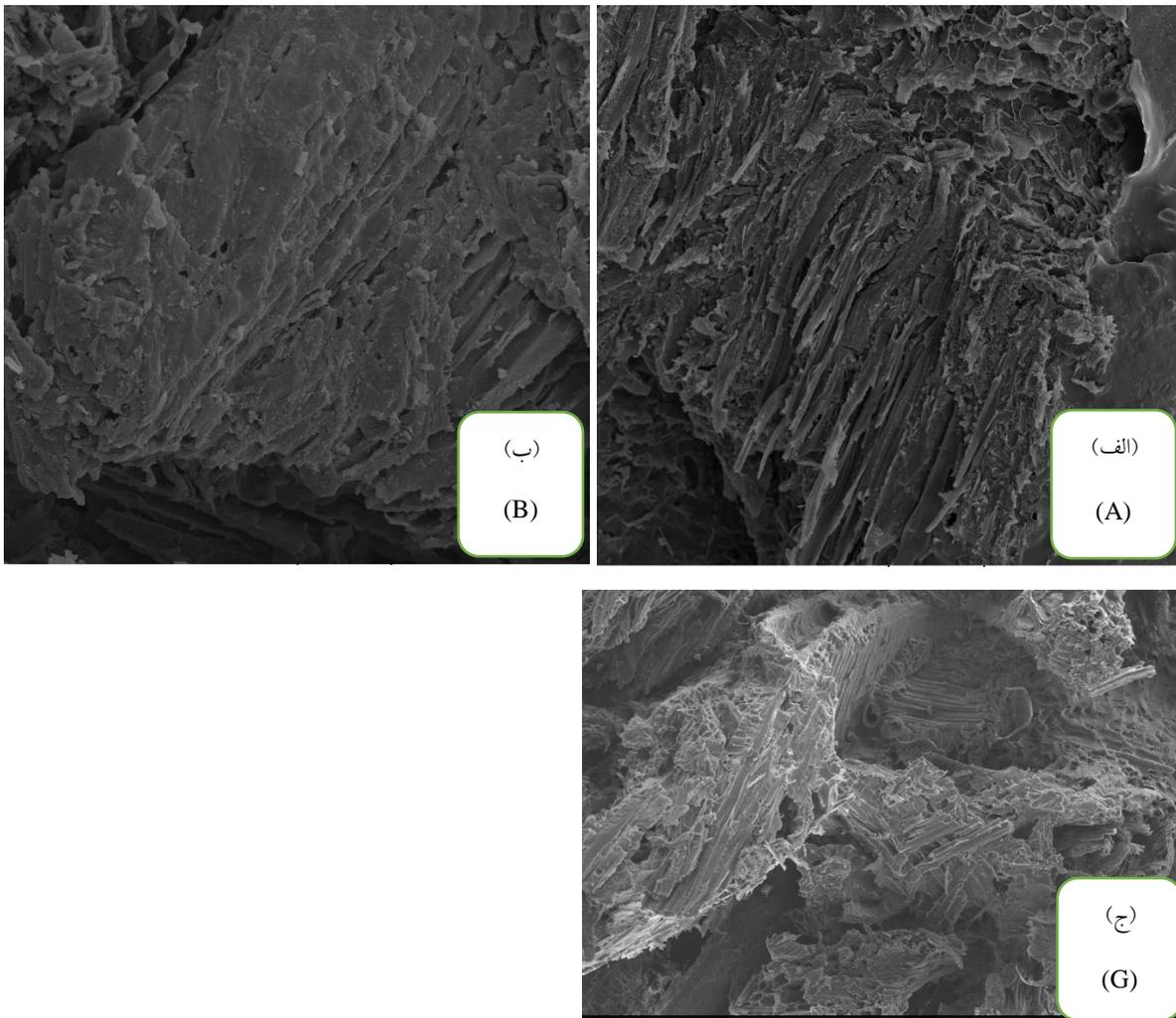
ضریب همبستگی: ۱/۰۰۰ ضریب اصلاحی: ۰/۹۹۹ *معنی دار در سطح ۵٪ ns عدم معنی داری



شکل ۶ انتشار گاز فرمالدئید تخته خرده چوب

Figure 6 Formaldehyde gas emission of particleboard

تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشی تخته خرده چوب با چسب شیراز (الف)، چسب شیراز و ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (ب)، چسب شیراز با ۱ گرم سمی کاربازید (ج) در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل (ب) نسبت به شکل (الف، ج) دارای سطح یکنواخت تر و صاف تر می باشد. همچنین منافذ کم دیده می شود که موجب افزایش چسبندگی و سازگاری پلیمر بین خرده چوب و چسب ایجاد کاهش حفرات، یکنواخت بودن سطح است. که نشان دهنده 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 بیشتری در تخته خرده چوب قابل مشاهده است که نشان دهنده این است که چسبندگی بین 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، غیر یکنواخت بودن سطح نسبت به شکل (الف و ب) می شود.



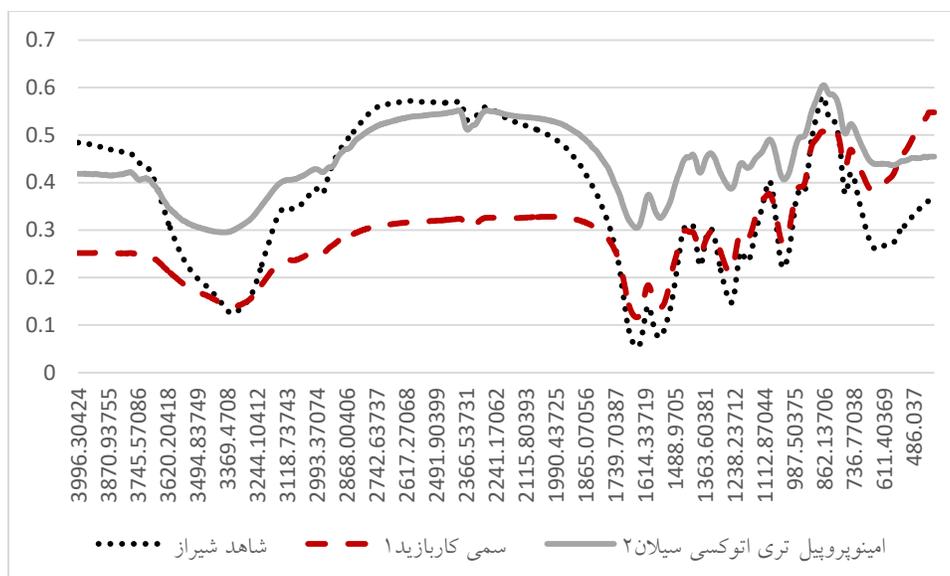
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشی الف: تخته خرده چوب ساخته شده با چسب شیراز ب: تخته خرده چوب ساخته شده با چسب شیراز و ۲ درصد آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان ج: تخته خرده چوب ساخته شده با چسب شیراز و ۱ گرم سمی کاربازید

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

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 تری اتوکسی سیلان معمولاً شامل طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) برای شناسایی پیک‌های مشخصه و گروه‌های عاملی است که بینش‌هایی 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، به ویژه سلولز و همی سلولز، 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 پیک 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 (-CH₂-) و پل‌های متیلن اتر را تشکیل می‌دهد (-CH₂-O-CH₂-). 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).

هنگامی که کلرید سمی کاربازید اضافه می‌شود، یک بخش سمی کاربازید (H₂N-NH-CO-NH₂) ایجاد می‌کند که می‌تواند با فرمالدئید واکنش دهد. سمی کاربازید خود حاوی گروه‌های آمین نوع اول (-NH₂) و آمین نوع دوم (-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. به طور خاص، سمی کاربازید گروه‌های عاملی هیدرازید (-NH-NH₂) را معرفی می‌کند (۲۸). پیک‌های مشخصه چنین گروه‌هایی، به ویژه امتدادهای N-H، در محدوده $3200-3300\text{ cm}^{-1}$ 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 به صورت 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 (NH₂) در آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان در ارتعاشات کششی N-H در ناحیه $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ و ارتعاشات خمشی N-H در حدود 1575 cm^{-1} و 1600 cm^{-1} نقش دارد (۳۱).



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

Figure 8 Infrared spectrum of particleboard treated with carbazide and aminopropyltriethoxysilane

نتیجه گیری

در این پژوهش، بررسی تأثیر افزودنی‌های سمی کاربازید بر خواص فیزیکی- مکانیکی و انتشار گاز فرمالدئید در تخته خرده 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 الاستیسته 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 تری اتوکسی سیلان به چسب اوره فرمالدئید و ساخت تخته خرده 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 این که استفاده از آمینو پروپیل تری اتوکسی موجب کاهش انتشار فرمالدئید و افزایش مقاومت مکانیکی تخته حاصل گردید. پیشنهاد می‌شود در ساخت تخته خرده چوب از ماده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی تخته و کاهش انتشار فرمالدئید استفاده شود.

منابع

1. Kelleci, O, Koksall, S. E, Aydemir, D and 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 and 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, and 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 and 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 and 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 and 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 and 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, and 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. and 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. and 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., and 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. and 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. and 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*, 490–495, 3476–3480.
22. Tjeerdsma, B. F. and 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. and Kandru, A. (2025). IDENTIFICATION OF FUNCTIONAL GROUPS AND CHEMICAL PROFILING OF IPOMOEA PARASITICA USING FTIR SPECTROSCOPY. *International Journal on Biological Sciences*, 16(01), 17–26.
24. Zorba, T., Papadopoulou, E., Hatjiisaak, 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.