

## ساخت و ارزیابی تخته خرده چوب سبک وزن با استفاده از پلی اورتان منبسط شده

محمد حامد<sup>۱</sup>، بابک نصرتی<sup>۲\*</sup>، علی شالبافان<sup>۳</sup>، محمد دهمرده قلعه نو<sup>۴</sup> و سعیدرضا فرخ پیام<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری کامپوزیت های لیگنوسلولزی، دانشگاه زابل، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران، پست الکترونیک: nosrati.babak@uoz.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، شهرستان نور، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

۵- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

تاریخ دریافت: آذر ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: آبان ۱۴۰۱

### چکیده

در سالهای اخیر، مهمترین چالش کارخانه های تولیدکننده اوراق فشرده چوبی افزایش تقاضا برای مواد خام چوبی است که افزایش شدید قیمت مواد اولیه چوبی را به همراه داشته است. از سوی دیگر، استفاد از عناصر سبک وزن در ساخت دکوراسیون و مبلمان نیز بدلیل کاهش هزینه های حمل و نقل و قابلیت تولید مبلمان های حجمی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر سطوح مختلف دو متغیر اندازه و مقدار خرده های پلی اورتان منبسط شده در تولید تخته خرده چوب سبک وزن بوده است. از این رو، بدین منظور اندازه خرده های پلی اورتان در سه سطح (۱۰،۵ و ۱۵ میلی متر) و مقدار آن در سه سطح (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) به عنوان متغیرهای تحقیق و مقدار مصرف چسب، فشار پرس، ضخامت تخته و دانسیته نهایی به عنوان عوامل ثابت در نظر گرفته شده است. نمونه بدون خرده های پلی اورتان به عنوان شاهد نیز ساخته شد. نتایج نشان دادند که مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته خمشی، چسبندگی داخلی و واکنشیدگی ضخامت با افزایش اندازه خرده های پلی اورتان در لایه میانی تخته افزایش قابل توجهی یافته است، اما اثر اندازه تأثیر معنی داری بر جذب آب نمونه ها نداشته است. همچنین افزایش درصد مقدار پلی اورتان در لایه میانی باعث افزایش ویژگی های مکانیکی و بهبود خصوصیات فیزیکی نسبت به نمونه شاهد گردید و بیشترین اثرگذاری آن بر چسبندگی داخلی نمونه ها مشاهده شد.

واژه های کلیدی: اندازه ذرات، پانل های سبک وزن، پلی اورتان، سبک سازی، منبسط شده

### مقدمه

در صنعت مبلمان، کاهش وزن به دلایل اقتصادی (مواد مصرفی کمتر، کاهش هزینه های حمل و نقل، سهولت در مونتاژ کردن، آسیب کمتر اتصالات به دلیل وزن زیاد مبلمان های سنتی، افزایش قیمت نهایی محصول، دلایل زیست محیطی استفاده از منابع چوبی کمتر) مطلوب است (Khojasteh, Khosro et al., 2021). برای کاهش دانسیته چندسازه های چوبی راهبردهای مختلفی وجود دارد که یکی از این

کامپوزیت های لیگنوسلولزی مواد هستند که از ترکیب مواد لیگنوسلولزی، رزین و سایر مواد (معمولاً تقویت کننده) ساخته می شوند که می توانند با اهداف مختلف و در صنایع متفاوت مورد استفاده قرار بگیرند (Monteiro et al., 2018). امروزه، کاربرد مواد سبک و فوق سبک در چندین صنعت مانند هوا فضا، ساختمان و مبلمان نقش مهم و اساسی دارند.

آنان نشان داد که استفاده از مقادیر مختلف فوم اتیلن وینیل استات موجب کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت، مدول الاستیسیته، چسبندگی داخلی و مقاومت به ضربه می‌گردد. اما با افزایش مصرف رزین و فوم اتیلن وینیل استات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بهبود می‌یابد و تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد از فوم اتیلن وینیل استات (EVA) و ۱۲ درصد از چسب اوره فرمالدئید مطلوب‌ترین خواص فیزیکی و مکانیکی را از خود نشان دادند.

Xiaosheng و Yanfang (۲۰۱۹) در تحقیقی، ساخت تخته فیبرها را با استفاده از ضایعات پودر پلی‌اورتان و الیاف چوب مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنان نشان داد تخته فیبرهایی که از ضایعات پودر پلی‌اورتان و الیاف چوب ساخته شده بود، مقدار چسبندگی داخلی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته آنها افزایش و مقادیر واکنشیدگی و جذب آب تخته فیبرها کاهش یافته است. در جایگزینی پلی‌اورتان به جای الیاف بهترین درصد، ۳۰ درصد وزن خشک الیاف بود که باعث بهبود عملکرد مکانیکی تخته فیبرها شد. با این حال، افزایش بیشتر از ۴۰ تا ۵۰ درصد از ضایعات پودر پلی‌اورتان به جای الیاف چوب منجر به کاهش عملکرد مکانیکی تخته فیبرها می‌شود. پودرهای فوم پلی‌اورتان ضایعاتی با اندازه مش ۱۲۰ نسبت به مش ۶۰ مخلوط با چسب متیل دی فنیل دی‌ایزوسیانات به دلیل چسبندگی بهتر با الیاف باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی تخته فیبرها شدند.

Mir و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی، سبک‌سازی تخته خرده‌چوب را با استفاده از پلی‌استایرن منبسط شونده مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که افزایش میزان گرانول‌های پلی‌استایرن فوم شده و دمای پرس تأثیر منفی بر چسبندگی داخلی داشته است. نتایج آنان همچنین نشان داد که با افزایش دما و درصد پلی‌استایرن منبسط شونده، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته بهبود می‌یابد. البته تخته‌های ساخته شده با ۵ درصد پلی‌استایرن منبسط شونده، مطلوب‌ترین میزان واکنشیدگی ضخامت و جذب آب را از خود نشان دادند.

مطالعات حاصل از تأثیر اندازه و مقدار پودر فوم‌های پلی‌اورتان سخت باز یافتی مخلوط با چسب متیل دی فنیل دی

راهبردهای متداول برای کاهش دانسیته پانل‌ها، استفاده از مواد اولیه با دانسیته پایین (سبک) مانند مواد لیگنوسلولزی یا گونه‌های چوبی سبک‌وزن یا سایر مواد حجیم اما سبک است (Méausoone et al., 2013). یادآوری می‌شود که کاهش دانسیته تخته خرده‌چوب معمولی با خلل و فرج زیاد به‌ویژه در لایه میانی تخته‌ها همراه خواهد بود و تخته‌های حاصل، مقاومت‌های مکانیکی و فیزیکی بسیار کمتر از حد معمول خواهند داشت. از این‌رو، استفاده از مواد غیرچوبی سبک اما حجیم مانند (پلی‌استایرن) به عنوان پرکننده، یکی از روش‌های غلبه بر چالش ذکر شده است (Shalbfan et al., 2016).

این پرکننده‌ها باید دارای ویژگی‌هایی از قبیل دسترسی آسان، سبک بودن، حجیم بودن و قیمت مناسب داشته باشند. بررسی‌ها نشان داده است که با ترکیب ۱۰ درصد مواد پلیمری سبک اما حجیم به عنوان پرکننده در لایه میانی با خرده‌های چوب درشت، می‌توان پانل‌های سبک وزن (دانسیته در محدوده ۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) با مقاومت‌های فیزیکی و مکانیکی مطلوب تولید کرد (Dziurka et al., 2015). محققان دیگری نیز پانل‌های سبک‌وزن ترکیبی با استفاده از گرانول‌های پلیمری منبسط شده را تولید کردند. نتایج تحقیق Shalbfan و همکاران (۲۰۱۶) بیانگر تأثیر مثبت استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرنی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پانل‌های سبک‌وزن ترکیبی تولید شده بوده است؛ به طوری که افزایش قطر گرانول‌های پلی‌استایرنی منبسط شونده بر ویژگی‌های مکانیکی به‌ویژه چسبندگی داخلی به‌طور معنی‌داری اثرگذار بوده است. با افزایش قطر گرانول‌ها درصد جذب آب نمونه‌ها تغییر محسوسی نداشته است ولی واکنشیدگی ضخامت به‌طور اندکی افزایش یافته است. افزایش درصد استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرنی ویژگی‌های مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، مقاومت به پیچ (سطح و لبه)، میزان چسبندگی داخلی و ویژگی‌های فیزیکی (درصد واکنشیدگی ضخامت و جذب آب) نمونه‌ها را به‌طور معنی‌داری افزایش داده است.

Etedali-Shehni و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی، سبک‌سازی تخته فیبر را با استفاده از فوم اتیلن وینیل استات (EVA) مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق

### مواد و روش‌ها

خرده چوب (مخلوط گونه‌های پهن‌برگان) مورد استفاده برای لایه‌های سطحی و میانی تخته‌ها از شرکت کیمیا چوب استان گلستان تهیه شد. برای جلوگیری از جذب رطوبت تا زمان ساخت تخته‌های آزمونی، در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شدند. فوم پلی‌اورتان مورد نیاز به عنوان پرکننده در لایه مرکزی از شرکت ماموت مطابق با مشخصات (جدول ۱) تهیه شد. فوم پلی‌اورتان سپس به وسیله اره فلکه مینی به صورت نگینی به ابعاد تقریبی  $۵ \times ۵$ ،  $۱۰ \times ۱۰$  و  $۱۵ \times ۱۵$  میلی‌متر مربع برش داده شدند. کاتالیزور کلرید آمونیوم از شرکت آریا شیمی و چسب اوره فرمالدهید از کارخانه صامد مشهد تهیه شد (جدول ۲).

ایزوسیانات (MDI) برای ساخت تخته خرده چوب، نشان داد که بهترین نسبت و اندازه به ترتیب ۵ درصد و ۵۰ میکرون برای تولید تخته خرده‌چوب، باعث مقاومت چسبندگی داخلی، کاهش جذب آب و بالا رفتن سایر مقاومت‌های مکانیکی شده است (Mao et al., 2014).

مرور منابع نشان می‌دهد که در تمام پژوهش‌های انجام شده تاکنون سعی بر استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرین منبسط شده و یا منبسط شونده با مقادیر مختلف و در ترکیب با خرده‌های چوب در لایه مرکزی تخته‌خرده‌چوب‌های سبک وزن بوده است. در هیچ‌یک از تحقیقات انجام شده در این زمینه تاکنون در مورد تأثیر اندازه و مقدار خرده‌های پلی‌اورتان در ساخت تخته خرده‌چوب بررسی در لایه میانی نشده است که در حقیقت جزو اهداف این تحقیق می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فنی فوم پلی‌اورتان شرکت ماموت

Table 1. Technical specifications of polyurethane foam of Mamut company

جذب آب (درصد) Water absorption (%)	هدایت حرارتی (w/mk) Thermal conductivity (w/mk)	درصد سلول بسته (%) Closed cell (%)	نقطه ذوب (سانتیگراد) Melting point (Celsius)	دانسیته (Kg/m3) Density (Kg/m3)
$\leq 1/5$	22%	$>95\%$	200	40

جدول ۲- مشخصات فنی رزین اوره فرمالدئید

Table 2. Technical specifications of urea formaldehyde resin

pH	زمان ژله‌ای شدن (s) Jelly time(s)	ویسکوزیته (cp) viscosity(cp)	درصد مواد جامد Solids(%)	وزن مخصوص g/cm3 Specific Weight g/cm3
7	320	56	62	1/24

آزمایشگاهی اقدام به فشردن سازی و ساخت تخته خرده چوب به ابعاد  $(۱۶ \times ۳۵۰ \times ۴۵۰)$  میلی‌متر مکعب گردید. در این بررسی عوامل متغیر اندازه ذرات فوم پلی‌اورتان در سه سطح (۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر) و مقدار پلی‌اورتان در سه سطح (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) براساس وزن خشک خرده چوب‌های مصرفی در لایه میانی، جایگزین خرده چوب‌های لایه میانی شد. سایر عوامل تولید شامل دمای پرس

در ادامه، عملیات چسب‌زنی خرده‌چوب‌ها با استفاده از چسب‌زن آزمایشگاهی دوار و با سرعت چرخش در حدود ۲۰ دور در دقیقه انجام گردید. محلول چسب همراه با کاتالیزور کلرید آمونیوم به وسیله یک نازل با استفاده از هوای فشرده در داخل استوانه چسب‌زن پاشیده شده و با خرده چوب‌ها و پلی‌اورتان داخل آن مخلوط شد. پس از تشکیل کیک خرده چوب، با استفاده از یک پرس گرم

EN326-1 نمونه‌های آزمونی تهیه شد. آزمون خمشی مطابق با استاندارد EN-310، چسبندگی داخلی مطابق با استاندارد EN-319 و جذب آب و واکنش ضخامت پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری مطابق با استاندارد EN-317 اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمون‌های مکانیکی (خمش سه نقطه‌ای، مدول الاستیسیته و مقاومت چسبندگی) از دستگاه INSTRON-1186 واقع در آزمایشگاه مکانیک دانشگاه زابل استفاده گردید. در این پژوهش، اثر تیمارهای مختلف با کاربرد آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ ارزیابی شد تا فاکتورهای مؤثر از لحاظ آماری شناسایی شوند و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای بررسی معنی‌دار بودن اثر متغیرها در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

۱۸۰ درجه سانتیگراد، زمان پرس ۲۸۰ ثانیه، نوع رزین اوره فرمالدئید، فشار اعمال شده در پرس گرم ۴ مگاپاسکال، مقدار مصرف چسب برای لایه‌های سطحی و میانی به ترتیب ۱۲ و ۱۰ درصد وزن خشک خرده‌های چوب مورد استفاده در هر لایه، نسبت وزنی خرده‌های چوب لایه‌های سطحی به میانی در همه تیمارها ثابت و برابر ۴۵ به ۵۵ درصد و کلرید آمونیوم به میزان ۲ درصد وزن خشک چسب مصرف شده در هر لایه تخته عوامل ثابت این پژوهش بودند. با در نظر گرفتن کلیه عوامل ثابت و متغیر، در مجموع تعداد ۱۰ تیمار تعریف شد که با در نظر گرفتن ۳ تکرار برای هر تیمار، در مجموع ۳۰ تخته آزمایشگاهی ساخته شد (جدول ۴). به منظور مشروط سازی و یکنواخت کردن رطوبت تخته‌ها و متعادل‌سازی تنش‌های داخلی، تخته‌های ساخته شده به مدت ۱۵ روز در شرایط کلیما نگهداری شدند. سپس طبق آیین‌نامه

جدول ۳- تیمارها و شرایط ساخت تخته خرده چوب سبک وزن

Table 3. Treatments and conditions for making light weight chipboard

کد تیمار Treatment code	درصد اختلاط پلی‌اورتان polyurethane Mixing ratio of	اندازه ذرات پلی‌اورتان Polyurethane particle size
T1	5	5
T2	5	10
T3	5	15
T4	10	5
T5	10	10
T6	10	15
T7	15	5
T8	15	10
T9	15	15
Witness (شاهد)	0	Without polyurethane

نتایج

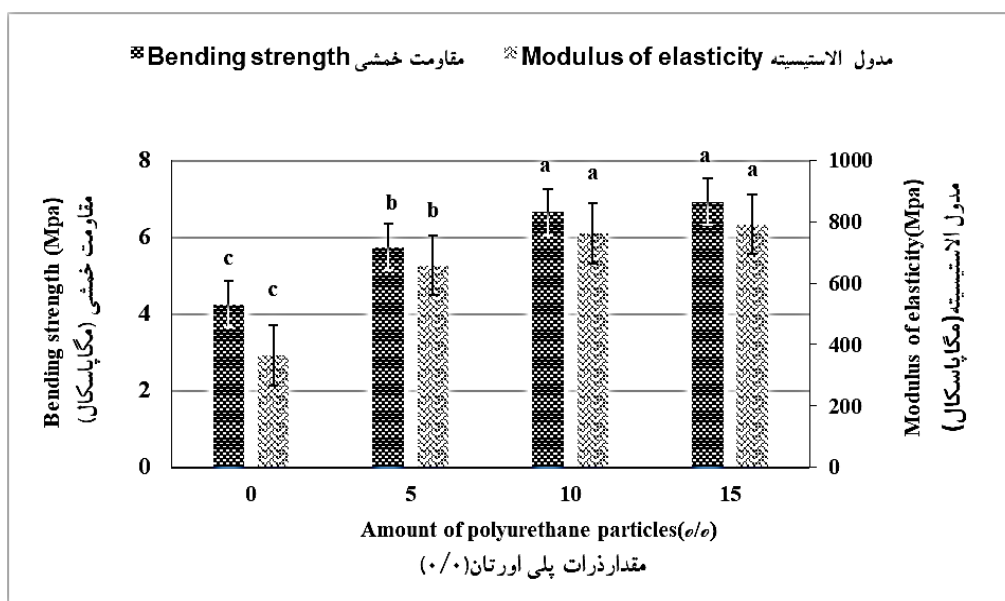
جدول ۴- خلاصه تجزیه واریانس خواص فیزیکی و مکانیکی تخته خرده چوب سبک وزن با استفاده از پلی اورتان منبسط شده

Table 4. Summary of analysis of variance of physical and mechanical properties of lightweight chipboard using expanded polyurethane

عوامل متغیر	مقاومت خمشی	مدول الاستیسیته	چسبندگی داخلی	واکشیدگی ضخامت بعد از جذب آب بعد از	
	(مگاپاسکال)	(مگاپاسکال)	(مگاپاسکال)	۲۴ ساعت (درصد)	۲۴ ساعت (درصد)
	Bending strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Internal bonding (MPa)	Thickness swelling absorption after 24h (%)	Water after 24h (%)
درصد اختلاط پلی اورتان	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	
Mixing ratio of polyurethane					
اندازه ذرات پلی اورتان	0.000*	0.000*	0.000*	98%	0.000*
Polyurethane particle siz					

ns: عدم معنی داری  
Lack of meaning

\*: معنی داری در سطح ۵ درصد  
Significance at the level of 5%



شکل ۱- تأثیر درصد مصرف خرده‌های پلی اورتان بر ویژگی‌های خمشی تخته خرده‌چوب‌های سبک وزن (نوار خطا بیانگر انحراف معیار است)

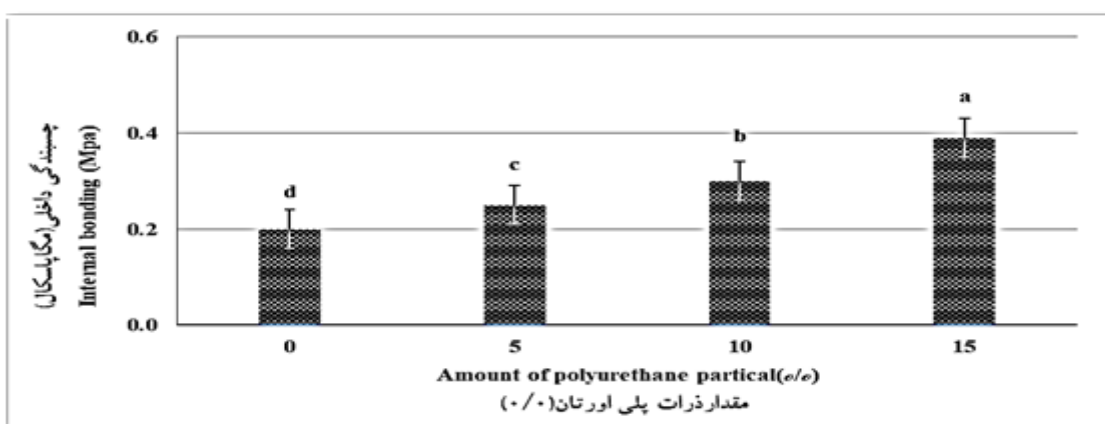
Figure 1. The effect of the Consumption percentage of polyurethane particles on the bending characteristics of light weight chipboard (the error bar represents the standard deviation)

شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن خرده‌های پلی اورتان باعث افزایش معنی دار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها در سطح ۵ درصد گردیده است. به طوری که مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در نمونه شاهد

تأثیر درصدهای مختلف مصرف خرده‌های پلی اورتان بر ویژگی‌های تخته خرده چوب سبک وزن تأثیر استفاده از درصدهای مختلف مصرف خرده‌های پلی اورتان بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها در

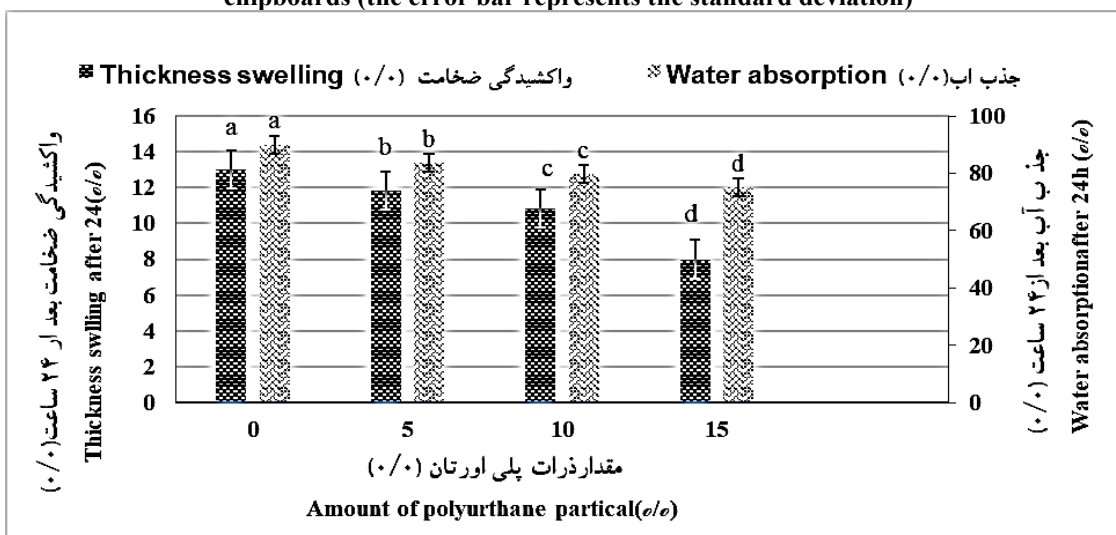
از نظر گروه‌بندی دانکن نیز در یک سطح قرار دارند. نتایج حاصل از شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش درصد مصرف خرده‌های پلی‌اورتان از ۰ به ۱۵ درصد میزان چسبندگی داخلی در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار و به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که میزان چسبندگی داخلی در نمونه‌های شاهد (صفر درصد مصرف خرده‌های پلی‌اورتان) از حدود ۰/۲ مگاپاسکال به حدود ۰/۳۹ مگاپاسکال در نمونه با ۱۵ درصد گرانول رسیده است.

به ترتیب از ۴/۲۴ و ۳۶۴/۶۴ مگاپاسکال به حدود ۶/۹۲ و ۷۹۱/۴ مگاپاسکال در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد خرده‌های پلی‌اورتان منبسط شده رسیده است. به عبارت دیگر، جایگزینی خرده‌های پلی‌اورتان با خرده‌های چوب به میزان ۱۵ درصد در لایه مرکزی به ترتیب افزایش حدود ۶۳ و ۱۱۷ درصدی در مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها را به همراه داشته است. اما نکته حائز اهمیت عدم تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد خرده‌های پلی‌اورتان است که



شکل ۲- تأثیر درصد مصرف خرده‌های پلی‌اورتان بر چسبندگی داخلی تخته‌خردچوب‌های سبک وزن (نوار خطا بیانگر انحراف معیار است)

Figure 2. The effect of the consumption percentage of polyurethane chips on the internal labeling of lightweight chipboards (the error bar represents the standard deviation)

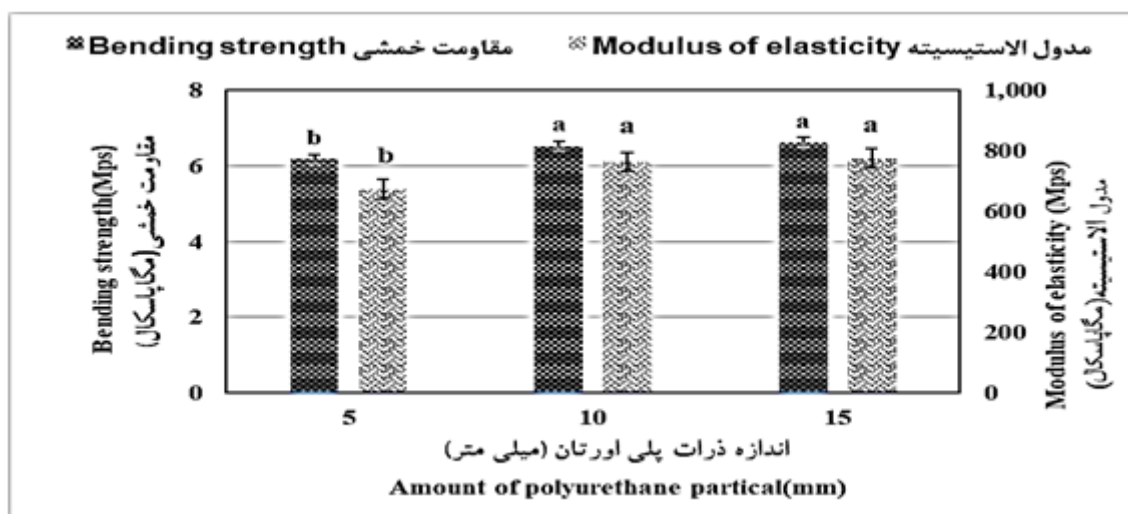


شکل ۳- تأثیر درصد مصرف خرده‌های پلی‌اورتان بر واکنشیدگی ضخامت و جذب آب تخته‌خردچوب سبک‌وزن بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب (نوار خطا بیانگر انحراف معیار است)

Figure 3. The effect of the consumption percentage of polyurethane particles on the thickness and water absorption of light-weight chipboard after 24 hours of immersion in water (the error bar represents the standard deviation)

تأثیر اندازه خرده‌های پلی‌اورتان بر ویژگی‌های تخته‌خرده چوب‌های سبک وزن نتایج مربوط به مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته تخته‌خرده‌چوب سبک وزن تولید شده در شکل ۴ نشان می‌دهند که افزایش اندازه‌های خرده‌های پلی‌اورتان در سطح آماری ۵ درصد باعث افزایش معنی‌دار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها شده است. مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها با اندازه ۵ میلی‌متر خرده‌های پلی‌اورتان به ترتیب از ۶/۲ و ۶۷۳/۶۲ مگاپاسکال به حدود ۶/۶۲ و ۷۷۴/۴۵ مگاپاسکال در نمونه‌ها با اندازه ۱۵ میلی‌متر خرده‌های پلی‌اورتان منبسط شده رسیده است. اما تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های ساخته‌شده با اندازه‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر خرده‌های پلی‌اورتان وجود ندارد و از نظر گروه‌بندی دانکن در یک سطح قرار دارند.

تأثیر جایگزینی درصد‌های مختلف خرده‌های پلی‌اورتان با خرده‌های چوب در لایه میانی پانل‌های چوبی بر واکنشیدگی ضخامت و جذب آب نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود واکنشیدگی ضخامت با افزایش درصد مصرف خرده‌های پلی‌اورتان از ۰ تا ۱۵ درصد در سطح آماری ۵ درصد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان واکنشیدگی ضخامت بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب مربوط به نمونه شاهد با ۱۳ درصد و کمترین آن در تیمار ۱۵ درصد مصرف خرده‌های پلی‌اورتان با ۸ درصد مشاهده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان جذب آب نیز مربوط به نمونه شاهد (صفر درصد پلی‌اورتان) به مقدار ۹۰ درصد و کمترین میزان جذب آب مربوط به تیمار ۱۵ درصد به مقدار ۷۵ درصد مشاهده می‌شود.

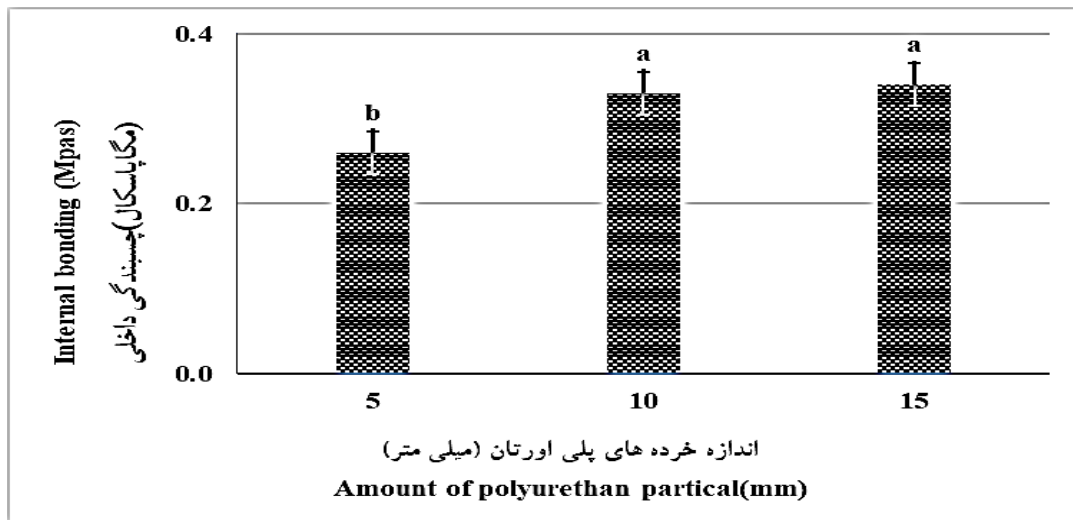


شکل ۴- تأثیر اندازه خرده‌های پلی‌اورتان بر ویژگی‌های خمشی تخته‌خرده‌چوب‌های سبک وزن (نوار خطا بیانگر انحراف معیار است)

Figure 4. The effect of the size of polyurethane particles on the bending characteristics of light weight board (the error bar represents the standard deviation)

مگاپاسکال در نمونه‌های با اندازه ۱۵ میلی‌متر رسیده است. اما تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های ساخته‌شده با اندازه‌های پلی‌اورتان ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر مشاهده نشده است.

نتایج حاصل از شکل ۵ نشان می‌دهد که اندازه پلیمرهای درشت‌تر باعث افزایش معنی‌دار چسبندگی داخلی در سطح آماری ۵ درصد شده است؛ به‌طوری‌که چسبندگی داخلی از ۰/۲۸ مگاپاسکال در نمونه‌های با اندازه ۵ میلی‌متر به ۰/۳۵

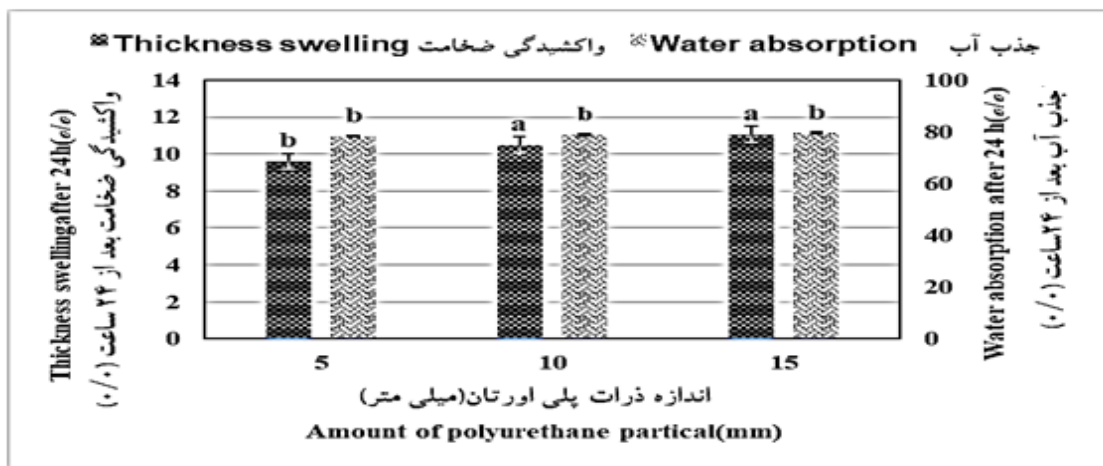


شکل ۵- تأثیر اندازه خرده‌های پلی‌اورتان بر چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب‌های سبک وزن (نوار خطا بیانگر انحراف معیار است)

Figure 5. The effect of the size of polyurethane chips on the internal adhesion of light weight chipboard (the error bar represents the standard deviation)

های با اندازه ۱۵ میلی‌متر رسیده‌اند. اما نمونه‌های ساخته شده با اندازه‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر خرده‌های پلی‌اورتان تفاوت معنی‌داری با هم در سطح آماری ۵ درصد از نظر واکنش‌پذیری ضخامت ندارند و از نظر گروه‌بندی دانکن در یک سطح هستند.

نتایج حاصل از شکل ۶ نشان داد که با تغییر اندازه خرده‌های پلی‌اورتان از ۵ به ۱۵ میلی‌متر واکنش‌پذیری ضخامت به طور معنی‌داری در سطح آماری ۵ درصد افزایش یافته است، اما درصد جذب آب تغییر معنی‌داری نداشته است. واکنش‌پذیری ضخامت و جذب آب به ترتیب از ۹/۶ و ۷۸/۳۳ در نمونه‌های با اندازه ۵ میلی‌متر به ۱۱/۰۶ و ۷۹/۵ در نمونه



شکل ۶- تأثیر اندازه خرده‌های پلی‌اورتان بر واکنش‌پذیری ضخامت و جذب آب تخته‌خرده‌چوب سبک وزن بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری

در آب (نوار خطا بیانگر انحراف معیار است)

Figure 6. The effect of polyurethane particles on thickness elongation and water absorption of light weight chipboard after 24 hours of immersion in water (error bar indicates standard deviation)





شکل ۷- مراحل ساخت چندسازه‌های چوبی سبک وزن با استفاده از پلی‌اورتان منبسط شده

Figure 7. The stages of construction of several lightweight wooden structures using expanded polyurethane

## بحث

نتایج شکل ۱ نشان می‌دهد که افزودن خرده‌های پلی اورتان به لایه میانی تخته خرده‌چوب بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌های ساخته شده تأثیرگذار و اختلاف موجود بین نمونه‌ها از لحاظ آماری نیز معنی دار بوده است. این افزایش مربوط به پرکردن خلل و فرج موجود در لایه میانی تخته‌های سبک وزن توسط خرده‌های پلی‌اورتان است که توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های خمشی وارد شده به نمونه در هنگام آزمایش و در نهایت بهبود ویژگی‌های خمشی را به همراه داشته است. علاوه بر این، جایگزینی مقادیری از خرده چوب با خرده‌های پلی‌اورتان منبسط شده و حجیم باعث افزایش قابل توجه ضخامت کیک نسبت به نمونه شاهد می‌گردد. افزایش ضخامت کیک با افزایش ضریب فشردگی کیک مواد در هنگام پرس گرم همراه بوده است که تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های خمشی تخته‌ها نیز داشته است (Jafarnezhad et al., 2018).

نتایج همچنین نشان می‌دهند با افزایش درصد مصرف خرده‌های پلی‌اورتان در لایه میانی از ۱۰ به ۱۵ درصد، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها نیز افزایش جزئی یافته است که از لحاظ آماری این افزایش معنی دار نیست. این افزایش جزئی ویژگی‌های خمشی و مدول الاستیسیته مربوط به افزایش ضخامت کیک ناشی از بیشتر بودن خرده‌های پلی اورتان و در نتیجه افزایش جزئی ضریب فشردگی کیک مواد در هنگام پرس گرم بوده است. به طوری که در پژوهش‌های مشابه با پلیمرهای دیگر که توسط Etedali-Shehni و همکاران (۲۰۲۱)، Dosthoseini و همکاران (۲۰۱۲) و Shalbafan و همکاران (۲۰۱۶) انجام شده به چنین نتایجی رسیده‌اند.

بررسی میزان چسبندگی داخلی تخته‌های ساخته شده نشان دادند که این ویژگی به طور معنی‌داری تحت تأثیر درصدهای مختلف خرده‌های پلی‌اورتان در لایه میانی نمونه‌ها می‌باشد. به طوری که این افزایش قابل توجه مربوط به

Shalbfan و همکاران (۲۰۱۶) و Raps و همکاران (۲۰۱۵) انجام شده نیز به چنین نتایجی رسیده‌اند.

همچنین نتایج نشان داد که استفاده از خرده‌های درشت‌تر باعث افزایش معنی‌دار چسبندگی داخلی گردیده است. اتصالات موجود در لایه مرکزی می‌تواند شامل اتصال خرده‌چوب-خرده‌چوب، خرده‌چوب-پلیمر و پلیمر-پلیمر باشد که در این بین نوع خرده‌چوب-خرده‌چوب محکم‌ترین اتصال خواهد بود. به دلیل ماهیت غیرقطبی خرده‌های پلی اورتان و ماهیت قطبی خرده‌چوب‌ها، پیوند شیمیایی مستقیم بین آنها متصور نیست. البته پیوندهای ایجادشده بین خرده‌های پلی اورتان و خرده‌چوب‌ها بیشتر از نوع مکانیکی (درهم رفتگی) خواهد بود. خرده‌های درشت‌تر توانایی ایجاد درهم رفتگی‌های مکانیکی بیشتری را نسبت به خرده‌های ریزتر دارند. البته چسب اسپری شده موجود بر روی خرده‌های پلی اورتان و خرده‌چوب‌ها نیز می‌تواند پیوند شیمیایی برقرار کند. باید توجه داشت که سطح ویژه خرده‌های درشت‌تر بسیار کمتر از خرده‌های ریزتر است و از این رو بهره‌وری چسب مورد استفاده در نمونه‌های با خرده‌های درشت‌تر پلی اورتان بالاتر است و چسبندگی قوی‌تری بین خرده‌های پلی اورتان و خرده‌های چوب برقرار شده است. همچنین در یک وزن مساوی، خرده‌های پلی اورتان با اندازه کوچکتر دارای تعداد بیشتری نسبت به خرده‌های پلی اورتان درشت‌تر هستند. پراکندگی و توزیع خرده‌های پلی اورتان با اندازه کوچکتر در لایه میانی تخته بیشتر بوده و سطح بیشتری از خرده‌چوب‌های لایه میانی را پوشانده که اتصال خرده‌چوب با خرده‌چوب را تا حدودی محدود می‌کند و در نهایت اتصالات نسبتاً ضعیف‌تری در لایه مرکزی نمونه‌ها ایجاد شده است. اتصالات ضعیف‌تر مواد در لایه میانی باعث کاهش چسبندگی داخلی نمونه‌ها گردیده است. در پژوهش‌های مشابه با پلیمرهای دیگر که توسط Kazemi و همکاران (۲۰۲۲)، Dziurka و همکاران (۲۰۱۵) و Shalbfan و همکاران (۲۰۱۳) انجام شده نتایج مشابهی گزارش شده است.

با تغییر اندازه خرده‌های پلی اورتان و اکشیدگی ضخامت به طور معنی‌داری افزایش یافته است، اما درصد جذب آب تغییر

جایگزینی مقادیر متفاوت از خرده‌چوب‌های لایه میانی با خرده‌های پلی اورتان منبسط شده که حجم بسیار بالایی دارند و باعث افزایش توده مواد در لایه میانی و در نتیجه افزایش درهم‌رفتگی مکانیکی خرده‌های چوب و خرده‌های پلی اورتان می‌شود. این موضوع باعث بهبود پیوندهای موجود درون تخته‌ها شده و میزان چسبندگی داخلی را به‌طور بسیار زیادی افزایش داده است (Shalbfan *et al.*, 2016).

نتایج همچنین بیانگر کاهش معنی‌داری درصد جذب آب و اکشیدگی ضخامت با افزایش درصد خرده‌های پلی اورتان بوده است. زیرا علت این موضوع می‌تواند مربوط به حذف خرده‌چوب از لایه میانی و جایگزینی آن با خرده‌های پلی اورتان آبگریز باشد. از سوی دیگر خرده‌های پلی اورتان خلل و فرج و حفره‌های موجود در لایه میانی را پر کرده و با احاطه کردن خرده‌های چوب نفوذ آب به درون تخته را کاهش داده است. با توجه به ماهیت آبگریزی خرده‌های پلی اورتان، افزایش درصد خرده‌های پلی اورتان باعث کاهش بیشتر جذب آب و اکشیدگی ضخامت نمونه‌ها شده است. پژوهش‌های مشابه با پلیمرهای دیگر که توسط Mir و همکاران (۲۰۱۶)، McGrath و همکاران (۲۰۱۳) و Talavera و همکاران (۲۰۰۷) انجام شده نیز چنین نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند.

نتایج همچنین نشان دادند که با افزایش اندازه خرده‌های پلی اورتان در لایه میانی مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها افزایش یافته است که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار است. هدف اصلی استفاده از خرده‌های پلی اورتان در لایه مرکزی پانل‌های سبک‌وزن پرکردن خلل و فرج ناشی از کاهش دانسیته تخته‌هاست. یادآوری می‌شود که وجود خرده‌های پلی اورتان می‌تواند تا حدودی مانع اتصال بین خرده‌چوب‌ها در لایه مرکزی شود. بنابراین به نظر می‌رسد که خرده‌های بزرگتر به دلیل تعداد کمتر در مقدار مساوی (۱۵ درصد وزن خشک خرده‌چوب) بهتر توانسته‌اند خلل و فرج موجود در لایه مرکزی را پر کرده و کمتر مانع اتصال خرده‌چوب‌ها با یکدیگر شوند. در این حالت توزیع تنش در نمونه‌های حاوی خرده‌های بزرگتر به‌طور بهتری انجام شده است که تأثیر مثبتی بر افزایش ویژگی‌های خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها نیز داشته است. پژوهش‌های مشابه با پلیمرهای دیگر که توسط Kazemi و همکاران (۲۰۲۲)،

- polystyrene and rape straw to the manufacture of lightweight particleboards. *Ciencia y Tecnologia*, 17(3): 647-656.
- Etedali-Shehni, Sh., Khazaeian, A., and Shakeri, A., 2021. Production and evaluation of lightweight fiberboard using ethylene-vinyl acetate foam. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 12, No. 3. (In Persian)
- Jafarnezhad, S., Shalbafan, A. and Luedtke, J., 2018. Effect of the expanded polystyrene granules on the physical and mechanical properties of hybrid lightweight panels. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 9, No. 3., (In Persian)
- Kazemi, R., Faraji, F., Aminian, H. and Vaziri, V., 2022. The possibility of using waste tire particles for oriented strand board production. *Iranian Journal of Wood and Paper Science*
- Khojasteh-Khosro, S., Shalbafan, A. and Thoemen, H., 2021. Development of ultra-light foam-core fiberboard for furniture application. *European Journal of Wood and Wood Products*, 1-15. DOI: 10.1007/s00107-021-01723-0.
- Mao, A., Shmulsky, R., Li, Q. and Wan, H., 2014. Recycling polyurethane materials, A comparison of polyol from glycolysis with micronized polyurethane powder in particleboard applications. *Bio Resources*, 9 (3): 53-65.
- McGrath, J.E., Hickner, M.A. and Höfer, R., 2013. Polymers for a sustainable environment and green energy. *Polymer Science: a comprehensive reference*, 10, 849.
- Méausoone, P.J. and Aguilera, A., 2013. Inventory of Experimental Works on Cutting Tools' Life for the Wood Industry. *Research Developments in Wood Engineering and Technology*, 1:320-342
- Mir, S., Farrokhpayam, S., Nazarian, M. and Mansouri, H., 2016. Lightweight particleboard using expanded polystyrene. *J. of Wood & Forest Science and Technology*, 22(4): 239-253. (In Persian)
- Monteiro, S., Martins, J., Magalhães, F.D. and Carvalho, L., 2018. Lightweight wood composites: challenges, production, and performance. In *Lignocellulosic Composite Materials* (pp. 293-322). Springer, Cham
- Raps, D., Hosseiny, N., Park, C.B. and Altsadt, V., 2015. Past and present developments in polymer bead foams and bead foaming technology. *Polymer*, 56(2): 5-19.
- Shalbafan, A., Tackmann, O. and Welling, J., 2016. Using of expandable fillers to produce low density particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(1):15-22.
- Shalbafan, A., Welling, J. and Luedtke, J., 2013. Effect of processing parameters on physical and structural
- معنی داری نداشته است. استفاده از خرده‌های پلی‌اورتان با اندازه کوچکتر نسبت به پلی‌اورتان با اندازه بزرگتر دارای تعداد بیشتری از مقدار خود در یک وزن مساوی (۱۵ درصد وزن خشک خرده‌چوب) هستند. از این رو، به نظر دسترسی مولکولهای آب به خرده‌چوب‌های نمونه‌های حاوی خرده‌های پلی‌اورتان درشت بیشتر و در نتیجه واکنشیدگی ضخامت افزایش یافته است. همچنین به دلیل یکسان بودن میزان خرده‌های پلی‌اورتان (۱۵ درصد) در همه تیمارها و با توجه به مقدار ثابت ماده چوبی در نمونه‌ها و دانسیته تقریباً برابر، درصد جذب آب تقریباً ثابت و حدود ۹۰ درصد بوده است. محققان دیگر نیز در پژوهش‌های مشابه با پلیمرهای دیگر نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند (Raps *et al.*, 2015; Shalbafan *et al.*, 2016).
- به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که جایگزینی خرده‌های چوب با خرده‌های پلی‌اورتان با اندازه ۱۰ میلی‌متر و در صد های پایین ۵ و ۱۰ درصد ماده مناسبی برای تولید تخته‌خرده چوب‌های سبک وزن در صنعت هستند که تأثیرهای مثبتی بر ویژگی‌های آنها نیز دارد. کاهش دانسیته پانل‌های چوبی تأثیر مثبتی بر کاهش رقابت مخرب بین تولیدکنندگان اوراق فشرده چوبی برای تأمین ماده اولیه چوبی دارد. در این تحقیق تخته‌خرده‌چوب سبک وزن با حدود ۲۰ درصد دانسیته کمتر نسبت به تخته‌خرده‌چوب‌های معمول تولید شد، در حالی که تخته‌های حاصل از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مطلوب برای استفاده در مبلمان‌های سبک وزن تولید شدند.

## منابع مورد استفاده

- Dosthoseini, k., 2012. Wood composite materials, manufacturing and applications, University of Tehran press, Tehran. (In Persian)
- Dziurka, D., Mirski, R. and Łęcka, J., 2010. Rape Straw as a Substitute of Chips in Core Layers of Particleboards Resinated with PMDI. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 13(4): 1-16.
- Dziurka, D., Mirski, R., Dukarska, D. and Derkowski, A., 2015. Possibility of using the expanded

- thickness swelling of bagasse/plastic composite boards. *Industrial Crops and Products*, 26(1):1-7.
- Weinkoetz, S., 2012. Kaurit-light for lightweight wood-based panels, In: 2nd Symposium on lightweight furniture. May 23-24, Lemgo, Germany.
- Xiaosheng, L. and Yanfang, P., 2019. Recycling Polyurethane Materials to Improve Properties of Wood Composite Panels *American Journal of Agriculture and Forestry*, 7(4): 146-150
- properties of lightweight foam core sandwich panels. *Wood Material Science and Engineering*, 8(1): 1-12.
- Shalbfan, A., Welling, J. and Luedtke, J., 2012. Effect of processing parameters on mechanical properties of lightweight foam core sandwich panels. *Wood Material Science & Engineering*, 7(2): 69-75.
- Talavera, F.F., Guzmán, J.S., Richter, H.G., Dueñas, R.S. and Quirarte, J.R., 2007. Effect of production variables on bending properties, water absorption and

## Production and evaluation of lightweight particle board using expanded polyurethane foam

M. Hamed<sup>1</sup>, B. Nosrati<sup>2\*</sup>, A. Shalbafan<sup>3</sup>, M. Dehmardeh Ghalehno<sup>4</sup> and  
S.R. Farrokh Payam<sup>5</sup>

1- Ph.D. Student in Lignocellulosic Composites, Zabol University, Iran

2\*-Corresponding Author, Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology Engineering, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Iran, Email: nosrati.babak@uoz.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology Engineering, Faculty of Natural Resources, Noor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology Engineering, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Iran

5- Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology Engineering, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Iran

Received: Nov., 2022

Accepted: Dec., 2022

### Abstract

In recent years, the most important challenge for wood-based panel's producers has been an increasing demand for wood raw materials, raw material prices, and rising transportation costs. On the other hand, the application of lightweight elements in the manufacture of decorative furniture has received more attention. The present study aimed at evaluating the effect of different levels of size and the amount of expanded polyurethane particles in the production of lightweight particle boards. The size of polyurethane particles at three levels (10, 5, and 15 mm) and the amount at four levels (10, 5, 0, and 15%) were selected as variable factors, and the amount of adhesive consumption, press pressure, board thickness, and final density were considered as fixed factors. The results showed that flexural strength, the flexural modulus of elasticity, internal bonding, and thickness swelling increased significantly with increasing the size of polyurethane particles in the middle layer of the board, but the effect of size was not significant on the water absorption of the samples. Also, increasing the percentage of polyurethane in the middle layer increased the mechanical properties and improved the physical properties compared to the control sample, and it had the largest effect on the internal bonding of the samples.

**Keywords:** Lightweight composite, expanded polyurethane foam, light weighting, particle size.