نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل
جلد بیست و هفتم، شماره اول، ۱۳۹۹
۱۱۱-۱۲۵
http://jwfst.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwfst.2020.17803.1860

# تأثیر نوع و مقدار گرانول‌های پلی‌استایرنی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های سبک‌وزن چوبی

**صابر جعفرنژاد ثانی[۱]، *علی شالبافان[۲] و یان لوتکه[۳]**

[۱]دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران،
[۲]استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران،
[۳]استادیار مؤسسه پژوهش‌های چوب تونن، هامبورگ، آلمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

## چکیده

**سابقه و هدف:** امروزه تولید اوراق فشرده چوبی با دانسیته کم‌تر (حدود ۲۵ درصد کم‌تر نسبت به پانل‌های معمولی) به‌دلیل افزایش بی‌رویه قیمت چوب و هم‌چنین نیاز بازار به محصولات سبک‌وزن بسیار مورد توجه صنایع اوراق فشرده چوبی در دنیا می‌باشد. برای تولید چندسازه‌های سبک‌وزن چوبی، مواد و روش‌های مختلفی در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. در این بین، استفاده از مواد اولیه سبک‌وزن و پرحجم مانند مواد پلیمری بسیار سبک بیش‌تر مورد توجه پژوهشگران و تولیدکنندگان برای کاهش دانسیته اوراق فشرده چوبی بوده است. استفاده هم‌زمان از خصوصیات و ویژگی‌های منحصربه‌فرد دو یا چند ماده متداول چوبی برای تولید چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن نیز می‌تواند بهبود عملکرد فرآورده تولیدشده را نیز به همراه داشته باشد. هدف از پژوهش حاضر، تولید و ارزیابی چندسازه‌های سبک چوبی متشکل از لایه‌های سطحی الیاف و لایه میانی از مخلوط خرده‌چوب و گرانول‌های پلی‌استایرنی بوده است. ازآن‌جاکه تاکنون در هیچ مطالعه‌ای، مقایسه‌ای بین نوع و درصد گرانول‌های پلی‌استایرنی قابل انبساط و از پیش منبسط‌شده بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های سبک چوبی صورت نگرفته است، در این پژوهش به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

**مواد و روش‌ها:** چندسازه‌های سبک چوبی با دانسیته ۵۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب با لایه‌های سطحی الیاف و لایه میانی از مخلوط خرده‌چوب و گرانول‌های پلی‌استایرنی تشکیل شد. برای ساخت تخته‌ها، از گرانول‌های پلی‌استایرنی در دو نوع از پیش منبسط‌شده و قابل انبساط و هر کدام در درصدهای مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن خشک خرده‌چوب‌های لایه میانی) استفاده شد. در این پژوهش، ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، چسبندگی داخلی، مقاومت به پیچ) و فیزیکی (درصد واکشیدگی ضخامت و جذب آب) نمونه‌های آزمونی مورد بررسی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** اطلاعات به‌دست‌آمده نشان دادند که استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرنی در لایه میانی باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد (بدون گرانول) شد. مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی گرانول‌های از پیش منبسط‌شده بسیار بیش‌تر از نمونه‌های حاوی گرانول‌های قابل انبساط بوده است، اما سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تفاوت خیلی

* مسئول مکاتبه: ali.shalbafan@modares.ac.ir

زیادی در نوع گرانول مصرفی نداشته‌اند. افزایش درصد گرانول تا ۱۵ درصد نیز تأثیر مثبتی بر چسبندگی داخلی، مقاومت به پیچ و ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها داشته است. درصد واکشیدگی ضخامت و درصد جذب آب نمونه‌ها در صورت استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است.

**نتیجه‌گیری:** افزایش درصد گرانول‌های پلی‌استایرنی بیش‌ترین تأثیر را در چسبندگی داخلی و مقاومت به پیچ نمونه‌ها داشته است. نتایج آزمون‌ها در ارتباط با مقایسه نوع گرانول‌های از پیش منبسط‌شده و قابل انبساط نشان داد که به‌استثنای مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تفاوت خیلی زیادی در نوع گرانول مصرفی نداشتند. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان داشت که استفاده از گرانول‌های قابل انبساط، با توجه به حذف مرحله پیش منبسط شدن آن‌ها و هم‌چنین افزایش بهره‌وری چسب برای تولید چندسازه‌های سبک چوبی توصیه می‌شود.

***واژه‌های کلیدی:*** اوره فرم‌آلدهید، چندسازه‌های سبک چوبی، خرده‌چوب، سبک‌وزن، گرانول پلی‌استایرن

## مقدمه

یکی از راهکارهای قابل‌توجه برای افزایش قدرت رقابت‌پذیری واحدهای تولیدی، استفاده بهینه از مواد خام برای تولید محصولات می‌باشد. دراین‌ارتباط، استفاده هم‌زمان از خصوصیات و ویژگی‌های منحصربه‌فرد دو یا چند نوع از شکل‌های مختلف قطعات چوبی و هم‌چنین تولید چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن (کاهش مصرف ماده خام چوبی) بسیار مورد توجه صاحبان صنایع چوب قرار گرفته است (۱۰). مواد خام مورداستفاده برای تولید انواع چندسازه‌های چوبی به‌صورت پودر، خرده، الیاف و تراشه چوب می‌باشد که با کنترل شرایط تولید و استفاده هم‌زمان از آن‌ها می‌توان به فرآورده‌هایی باارزش افزوده بیش‌تر و قیمت مناسب‌تر دست یافت (۱۳). امروزه بیش‌تر واحدهای تولیدکننده اوراق فشرده چوبی در یک مکان (به‌صورت مجتمع و متمرکز) دارای چندین خط تولید برای انواع اوراق فشرده چوبی (مانند تخته‌خرده‌چوب، انواع تخته فیبر و تخته تراشه) هستند که استفاده از قطعات چوبی به شکل‌های مختلف خرده‌چوب و الیاف مواد برای ساخت یک نوع محصول را بسیار ساده و امکان‌پذیر نموده است. متداول‌ترین استفاده هم‌زمان از مواد اولیه که بسیار در مجتمع‌های تولید اوراق فشرده چوبی در دنیا به‌کار می‌رود مربوط به استفاده از خرده‌چوب‌های درشت تخته‌خرده‌چوب در ترکیب با تراشه‌های مورداستفاده در لایه میانی تخته تراشه جهت‌دار می‌باشد (۱۹). تری بورد (Triboard) نام تجاری چندسازه چوبی تولیدی در نیوزلند است که برای لایه‌های سطحی آن از فیبر (الیاف چوبی) و لایه میانی آن از تراشه‌های چوبی استفاده می‌شود (۳). هم‌چنین پژوهشگران دیگر در مطالعه خویش به ارزیابی چندسازه چوبی تشکیل‌شده از لایه‌های سطحی خرده‌چوب و لایه میانی تراشه‌های چوبی پرداختند (۱۳). تخته‌های تولیدشده با این روش، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بهتری نسبت به تخته‌خرده‌چوب معمولی دارند.

شرکت‌های بزرگ تولیدکننده اوراق فشرده چوبی در آلمان و پرتغال به نام‌های Pfleiderer GmbH و Finsa اخیراً فرآورده‌های چندسازه چوبی را به تولید تجاری رسانده‌اند که در لایه‌های سطحی آن از الیاف چوب و لایه میانی از خرده‌چوب‌های درشت استفاده می‌کنند. محصول تولیدشده توانسته است مزایای تخته فیبر (سطوح صاف و متراکم) و تخته‌خرده‌چوب (استفاده از چوب‌های کم‌ارزش در لایه میانی) را

به‌طور هم‌زمان به دست آورد (۷). پرواضح است که قیمت تمام‌شده این محصول حدود ۲۰ درصد کم‌تر از امدی‌اف معمولی می‌باشد، زیرا اولاً تبدیل چوب به خرده‌چوب ارزان‌تر از تبدیل چوب به الیاف در یک مقدار مساوی می‌باشد و ثانیاً استفاده از چوب‌های ضایعاتی و کم‌ارزش برای تولید خرده‌چوب نیز امکان‌پذیر است. هر چند دانسیته چندسازه‌های چوبی تولیدشده نیز حدود ۱۰ درصد کم‌تر از امدی‌اف معمولی می‌باشد، اما همچنان مناسب برای استفاده در صنایع مبلمان سبک نمی‌باشد.

امروزه تولید اوراق فشرده چوبی با دانسیته کم‌تر (حدود ۲۵ درصد کم‌تر نسبت به پانل‌های معمولی) بسیار مورد توجه صنایع اوراق فشرده چوبی می‌باشد که به‌عنوان اوراق فشرده چوبی سبک‌وزن نیز شناخته می‌شود (۱۲). دو دلیل اصلی برای این موضوع ذکر گردیده است؛ افزایش قیمت چوب (کاهش دسترسی به منابع چوبی) و نیاز بازار به محصولات سبک‌وزن به‌علت توسعه روزافزون بازار مبلمان‌های قابل‌حمل (۱۱ و ۱۸). در گذشته پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد کاهش دانسیته اوراق فشرده چوبی صورت پذیرفته است و برای این منظور از مواد، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی استفاده‌شده است. استفاده از مواد اولیه سبک‌وزن و پرحجم مانند مواد پلیمری فوق سبک یکی از روش‌های متداول برای کاهش دانسیته اوراق فشرده چوبی مورد توجه می‌باشد (۵، ۹ و ۱۶). در همین ارتباط پژوهشگران تخته‌خرده‌چوب‌های سبک‌وزن با دانسیته ۵۰۰ $kg/m^3$ از لایه میانی کاه و گرانول‌های پلی‌استایرن منبسط‌شده با چسب ایزوسیانات و فنل فرمالدهید تولید نمودند (۱). نتایج نشان دادند که با استفاده از ۱۰ درصد گرانول پلی‌استایرن به‌صورت مخلوط با کاه و استفاده از چسب ایزوسیانات تخته‌هایی در حد استاندارد اروپایی EN312/P2 (مناسب برای شرایط خشک و داخل ساختمان) و با استفاده از چسب فنل فرمالدهید تخته‌هایی در حد استاندارد اروپایی EN312/P3 (مناسب برای شرایط مرطوب) می‌توان تولید نمود. در پژوهش دیگری، پژوهشگران استفاده ۱۰ درصدی از گرانول‌های پلی‌استایرن منبسط‌شده در لایه میانی را به‌منظور کاهش دانسیته تخته‌خرده‌چوب و تولید پانل‌های سبک‌وزن با مقاومت‌های فیزیکی و مکانیکی مطلوب پیشنهاد نمودند (۱٤). در پژوهش‌های دیگری نیز از دو ماده منبسط‌شده بر پایه نشاسته و پلی‌استایرن برای کاهش دانسیته تخته‌خرده‌چوب استفاده شد (۱۵ و ۲۰). وزن تخته‌ها به‌میزان ۲۰ درصد کاهش یافت، درحالی‌که تخته‌ها هم‌چنان حداقل ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی را دارا بودند. لازم به توجه است که بیش‌تر پژوهش‌های صورت پذیرفته در زمینه استفاده از پرکننده‌های پلیمری برای ساخت تخته‌های سبک‌وزن، مربوط به استفاده از گرانول‌های پلیمری از پیش منبسط‌شده بوده است. در پژوهشی پژوهشگران استفاده از گرانول‌های پلیمری قابل انبساط را برای تولید تخته‌خرده‌چوب سه‌لایه سبک‌وزن پیشنهاد نمودند (۱٦). استفاده از گرانول‌های پلیمری قابل انبساط به‌دلیل کاهش هزینه‌های تولید در نتیجه حذف مرحله پیش منبسط شدن گرانول‌ها و هم‌چنین افزایش بهره‌وری چسب به‌علت کاهش سطح ویژه پلی‌استایرن‌های قابل انبساط در مرحله چسب‌زنی مورد توجه است. هم‌چنین مشخص شد که استفاده از گرانول‌های پلیمری قابل انبساط با میانگین قطر بیش‌تر تأثیر بهتری بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تخته‌های سبک‌وزن تولیدشده دارد (۱۷).

با توجه به مجموع مطالب ذکرشده در بالا، هدف از پژوهش حاضر تولید و ارزیابی چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن (دانسیته ۵۲۰ $kg/m^3$) متشکل از لایه‌های سطحی الیاف و لایه میانی از مخلوط خرده‌چوب و گرانول‌های پلی‌استایرنی می‌باشد. دراین‌ارتباط، تأثیر

مقدار و نوع گرانول‌های پلی‌استایرنی قابل انبساط و از پیش‌منبسط‌شده بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های چوبی بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

**مواد:** الیاف و خرده‌چوب (از مخلوط گونه‌های پهن‌برگان) مورداستفاده برای لایه‌های سطحی و میانی تخته‌ها از شرکت کیمیا چوب استان گلستان با درصد رطوبت به‌ترتیب ۸ و ۳ درصد تهیه شد. گرانول‌های پلی‌استایرنی با وزن مخصوص ۱۰٤۰ $kg/m^3$ و درصد رطوبت کم‌تر از ۱ درصد از شرکت پتروشیمی سهند آمل تهیه شدند. گرانول‌های پلی‌استایرنی به دو صورت قابل انبساط و از پیش‌منبسط‌شده در لایه میانی تخته‌ها استفاده شد. چسب اوره فرمالدهید با درصد ماده جامد ٦۲ درصد در این پژوهش از شرکت آمل رزین خریداری شد. همچنین کاتالیزور کلرید آمونیوم ($NH_4CL$) از شرکت آریا شیمی آمل تهیه شد.

گرانول‌های پلی‌استایرنی در این پژوهش با درصدهای مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد (بر اساس وزن خشک خرده‌چوب‌های مصرفی در لایه میانی) جایگزین خرده‌چوب‌های لایه میانی گردید تا دانسیته نهایی چندسازه (۵۲۰ $kg/m^3$) نسبت به نمونه شاهد (بدون گرانول) ثابت بماند. گرانول‌های پلی‌استایرنی قابل انبساط تهیه‌شده از کارخانه دارای میانگین قطر حدود ۲/۵ میلی‌متر بودند. منبسط شدن گرانول‌های قابل انبساط برای پرکردن خلل و فرج موجود در لایه میانی تخته‌ها، داخل تخته و هم‌زمان در طی فرآیند پرس گرم تخته‌ها صورت پذیرفت. همچنین برای حالت استفاده از گرانول‌های از پیش منبسط‌شده، گرانول‌های قابل انبساط ابتدا در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شدند تا به حداکثر حجم خود برسند. میانگین قطر گرانول‌ها بعد از انبساط در آون حدود ۷ میلی‌متر بوده است. هم‌چنین برای ارزیابی تأثیر افزودن گرانول‌های پلی‌استایرنی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پانل‌ها، تخته‌های شاهد بدون استفاده از گرانول پلی‌استایرن تولید شدند. تیمارهای مورداستفاده در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.

**جدول ۱- تیمارهای مورداستفاده در پژوهش.**

**Table 1. Treatments used in the research.**

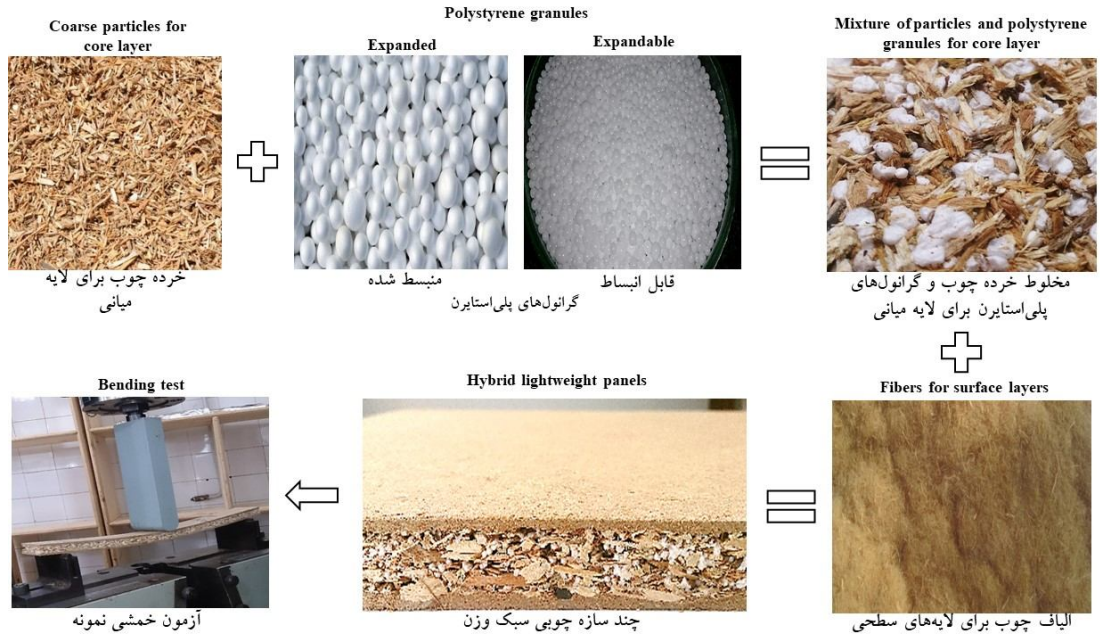
| تیمار<br>Treatment | نوع گرانول‌ها<br>Granules type | مقدار گرانول‌ها (٪)<br>Granules content (%) |
|---|---|---|
| A | منبسط‌شده<br>Expanded | 5 |
| B | | 10 |
| C | | 15 |
| D | قابل انبساط<br>Expandable | 5 |
| E | | 10 |
| F | | 15 |
| شاهد (Reference) | – | – |

* دانسیته پانل‌ها در همه تیمارها ثابت (۵۲۰ $kg/m^3$) در نظر گرفته شد.

* Panels density was kept constant (520 $kg/m^3$) in all treatments.

**ساخت چندسازه چوبی:** چندسازه چوبی سبک‌وزن با ضخامت نهایی ۱۶ میلی‌متر از کیک سه‌لایه مواد متشکل از الیاف چسب‌خورده برای لایه‌های سطحی و مخلوط خرده‌چوب‌های درشت و گرانول‌های پلی‌استایرن برای لایه میانی تولید شدند. برای این منظور، ابتدا چسب بعد از توزین با استفاده از سیستم باد و پیستوله بر روی مواد اسپری شد. مقدار مصرف چسب برای لایه‌های سطحی و میانی به‌ترتیب ۱۲ درصد و ۱۰ درصد وزن خشک مواد مورداستفاده در هر لایه بود. برای تشکیل لایه زیرین، الیاف چسب خورده درون یک قالب چوبی به ابعاد ۴۰۰ × ۵۰۰ میلی‌متر ریخته شدند. سپس برای تشکیل لایه میانی، مخلوط خرده‌چوب و پلی‌استایرن چسب‌زنی‌شده درون قالب ریخته شد. درنهایت برای تکمیل کیک مواد، الیاف چسب‌خورده برای لایه رویی درون قالب ریخته شد. کیک سه‌لایه (با درصد رطوبت ۱۲ درصد) ابتدا پیش پرس سرد و سپس درون پرس گرم به‌مدت ۲۸۸ ثانیه، درجه حرارت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ویژه ٤ مگاپاسکال قرار گرفت. برای افزایش کیفیت لایه‌های سطحی از گام‌های ویژه پرس (فشرده‌سازی اولیه) نیز استفاده شد (شکل ۱).

لازم به ذکر است که منظور از سبک‌سازی چندسازه در پژوهش حاضر، تولید چندسازه با دانسیته کم‌تر نسبت به تخته‌خرده‌چوب معمولی (۶۵۰–۶۸۰ $kg/m^3$) و یا تخته فیبر معمولی (۷۱۰–۷۷۰ $kg/m^3$) در بازار است. چندسازه تولیدشده در پژوهش حاضر، به‌ترتیب حدود ۲۲ درصد و ۳۰ درصد سبک‌تر نسبت به تخته‌خرده‌چوب و تخته فیبرهای (MDF) معمولی موجود در بازار است. با کاهش دانسیته، خلل و فرج موجود درون تخته به‌شدت افزایش می‌یابد. در این پژوهش تلاش شد تا حجم خلل و فرج موجود در تخته‌های سبک (۵۲۰ $kg/m^3$) از طریق جایگزینی اندکی از خرده‌چوب‌های لایه میانی یا گرانول‌های پلی‌استایرن کاهش یابد.




**شکل ۱- چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن با دو نوع گرانول پلی‌استایرن قابل انبساط و منبسط‌شده.**

**Figure 1. Hybrid-lightweight panels with two types of expandable and expanded polystyrene granules.**

تخته‌های ساخته‌شده طبق آیین‌نامه EN 326-1 برای انجام آزمون‌های مکانیکی و فیزیکی برش داده شدند. نمونه‌های آزمونی برای یکنواخت‌سازی رطوبت در شرایط رطوبت نسبی ۵ ± ٦٥ درصد و دمای ۳ ±۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در نهایت نمونه‌های تهیه‌شده مطابق جدول ۲ و با توجه به استاندارد اروپایی مورد آزمون قرار گرفتند. مشخصات پیچ مورداستفاده برای آزمون مقاومت نگهداری پیچ عبارت بود از: طول پیچ ۳۸ میلی‌متر، قطر پیچ ٤/۲ میلی‌متر و فاصله بین دو رزوه ۱/٤ میلی‌متر. عمق نفوذ پیچ در نمونه‌ها نیز ۰/۵ ± ۱۵ میلی‌متر بود.

**جدول ۲- آزمایش‌های مربوط به ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تخته‌های تولیدشده.**

**Table 2. Experiments to evaluate the physical and mechanical properties of the boards.**

| تعداد آزمایش<br>Number of experiments | تکرار تیمارها<br>Treatment repeat | ابعاد نمونه (میلی‌متر)<br>Sample size (mm) | شماره استاندارد<br>Standard No. | ویژگی‌ها<br>Properties |
|---|---|---|---|---|
| 63 | 9 | 370 × 50 × 16 | EN 310 | ویژگی‌های خمشی<br>Bending properties |
| 63 | 9 | 50 × 50 × 16 | EN 319 | چسبندگی داخلی<br>Internal bond |
| 126 | 9 | 750 × 50 × 16 | EN 320 | مقاومت نگهداری پیچ (سطح و لبه)<br>Screw withdrawal resistance (face and edge) |
| 63 | 9 | 50 × 50 × 16 | EN 317 | واکشیدگی ضخامت<br>Thickness swelling |
| 63 | 9 | 50 × 50 × 16 | - | جذب آب<br>Water absorption |

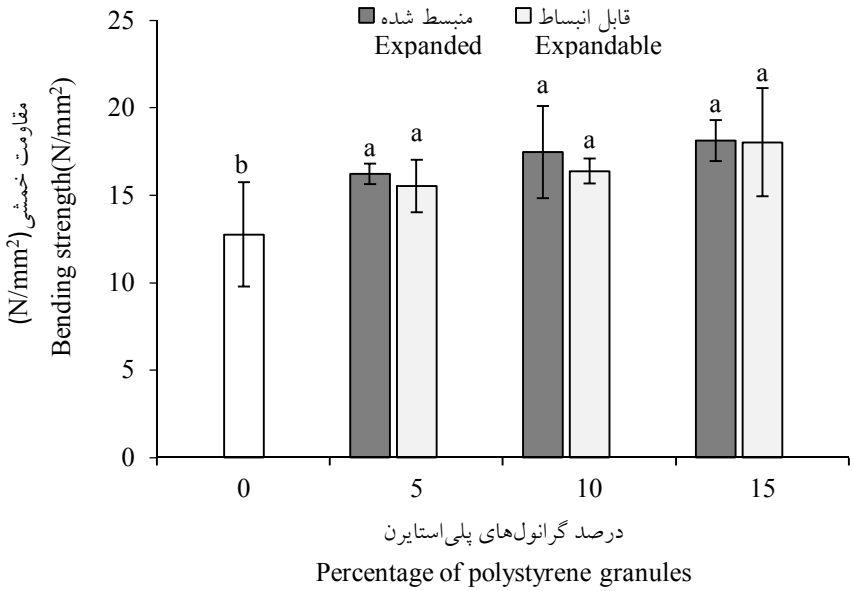
تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار Statistical Package for Social Science SPSS[1] انجام شد. قبل از انجام آزمون تجزیه واریانس، نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس آن‌ها کنترل گردید. سپس آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه صورت پذیرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام گرفت.

## نتایج

**ویژگی‌های خمشی:** تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلی‌استایرن بر مقاومت خمشی چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت خمشی در هر دو نوع گرانول قابل انبساط و از پیش‌منبسط‌شده اختلاف چشمگیری نداشته‌اند. با افزایش درصد گرانول‌های مصرفی از ۵ به ۱۵ درصد میزان مقاومت خمشی به‌طور اندکی افزایش یافته است، هر چند این میزان افزایش از لحاظ آماری برای هر دو نوع گرانول معنی‌دار نمی‌باشد. میزان مقاومت خمشی از حدود ١٦ $N/mm^2$ برای نمونه‌های حاوی ۵ درصد گرانول به حدود ۱۸ $N/mm^2$ برای نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد گرانول رسیده است. مقایسه نتایج با نمونه‌های شاهد نشان می‌دهد که استفاده از گرانول‌های پلیمری به‌عنوان پرکننده در لایه میانی تخته‌ها باعث افزایش

1- Statistical package for social science

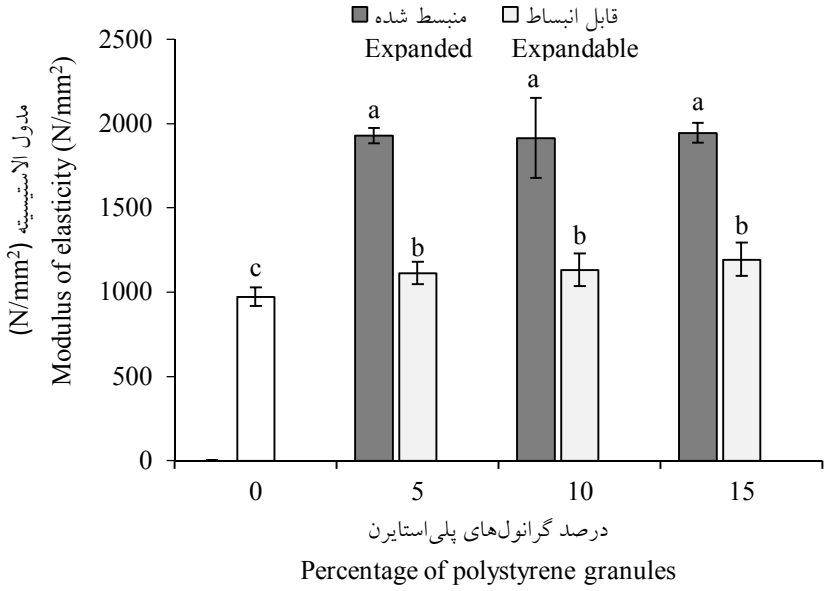
معنی‌دار مقاومت خمشی نمونه‌ها شده است. مقدار مقاومت خمشی در نمونه شاهد برابر ۱۲/۷ $N/mm^2$ بوده است. گرانول‌های پلیمری نقش پرکردن خلل و فرج موجود در لایه میانی تخته‌ها را دارد که خود توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های وارده به نمونه در هنگام آزمایش و هم‌چنین تأثیر مثبتی بر مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز نشان داده است. این نتایج با یافته‌های شالبافان و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. ایشان نتیجه گرفتند که استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرنی در تخته‌خرده‌چوب سبک‌وزن افزایش معنی‌داری مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد را به همراه دارد، هر چند افزایش درصد گرانول‌ها افزایش معنی‌داری نشان نداد (۱۶).




**شکل ۲- تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلی‌استایرن بر مقاومت خمشی چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن.**

**Figure 2. The effect of type and percentage of polystyrene granules on the bending strength of hybrid-lightweight panels.**

تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلی‌استایرن بر مدول الاستیسیته چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن در شکل ۳ ارائه گردیده است. مدول الاستیسیته در نمونه‌های با گرانول‌های از پیش منبسط‌شده حدود ۱۹۰۰ $N/mm^2$ و در نمونه‌های با گرانول‌های قابل انبساط حدود ۱۱۰۰ $N/mm^2$ بوده است؛ به‌عبارت‌دیگر، مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی گرانول‌های از پیش‌منبسط‌شده حدود ۷۰ درصد بیش‌تر از نمونه‌های حاوی گرانول‌های قابل‌انبساط می‌باشد. گرانول‌های از پیش‌منبسط‌شده دارای حجم بسیار بالاتری نسبت به گرانول‌های قابل‌انبساط در مرحله فرمینگ کیک هستند که افزایش ضخامت کیک مواد در مرحله فرمینگ را به همراه داشته است. بالاتر بودن ضخامت کیک مواد، افزایش درهم‌رفتگی مواد در لایه میانی و هم‌چنین بهبود فشردگی مواد در لایه‌های سطحی تخته را به همراه دارد که تأثیر مستقیمی بر مدول الاستیسیته نمونه‌ها نیز نشان داد (۱، ۸ و ۹).

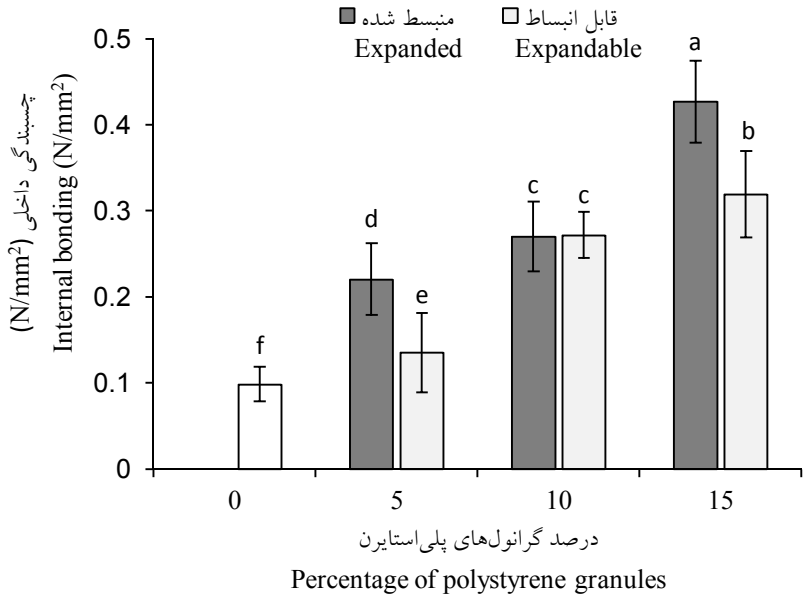



**شکل ۳- تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلی‌استایرن بر مدول الاستیسیته چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن.**

**Figure 3. The effect of type and percentage of polystyrene granules on the modulus of elasticity of hybrid-lightweight panels.**

افزایش درصد گرانول‌های پلیمری از ۵ به ۱۵ درصد در هر دو حالت گرانول‌های قابل انبساط و از پیش‌منبسط‌شده تغییر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته نمونه‌ها نداشته است که با یافته‌های پژوهشگران دیگری نیز همخوانی دارد (۱٤ و ۱٦). این موضوع از نقطه‌نظر اقتصادی دارای اهمیت است. نتایج هم‌چنین نشان دادند که مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی گرانول‌های پلی‌استایرنی به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از نمونه‌های شاهد است. مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی گرانول‌های از پیش‌منبسط‌شده بیش از دو برابر نمونه شاهد می‌باشد. دلیل این موضوع می‌تواند به فشردگی بیش‌تر مواد در لایه‌های سطحی مربوط باشد.

**چسبندگی داخلی:** نتایج حاصل از تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلی‌استایرنی بر چسبندگی داخلی چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن در شکل ٤ ارائه گردیده است. نتایج بیانگر افزایش معنی‌دار چسبندگی داخلی با افزایش درصد گرانول می‌باشد. میزان چسبندگی داخلی در نمونه شاهد (صفر درصد گرانول) حدود $N/mm^2$ ۰/۱ بوده است که به حدود $N/mm^2$ ۰/٤۳ در نمونه حاوی ۱۵ درصد گرانول از پیش‌منبسط‌شده و به حدود $N/mm^2$ ۰/۳۲ در نمونه حاوی ۱۵ درصد گرانول قابل انبساط رسیده است. در لایه میانی نمونه‌های شاهد خلل و فرج بسیار زیادی وجود دارد که به‌دلیل پایین بودن دانسیته نمونه‌ها نسبت به تخته فیبر و تخته‌خرده‌چوب‌های معمول موجود در بازار می‌باشد. این خلل و فرج توسط گرانول‌های پلی‌استایرنی پر شده‌اند که بهبود درهم‌رفتگی خرده‌چوب‌ها و ایجاد اتصالات مکانیکی قوی‌تر بین مواد لایه میانی را به همراه داشته و در نهایت چسبندگی داخلی نمونه‌ها افزایش یافته است.



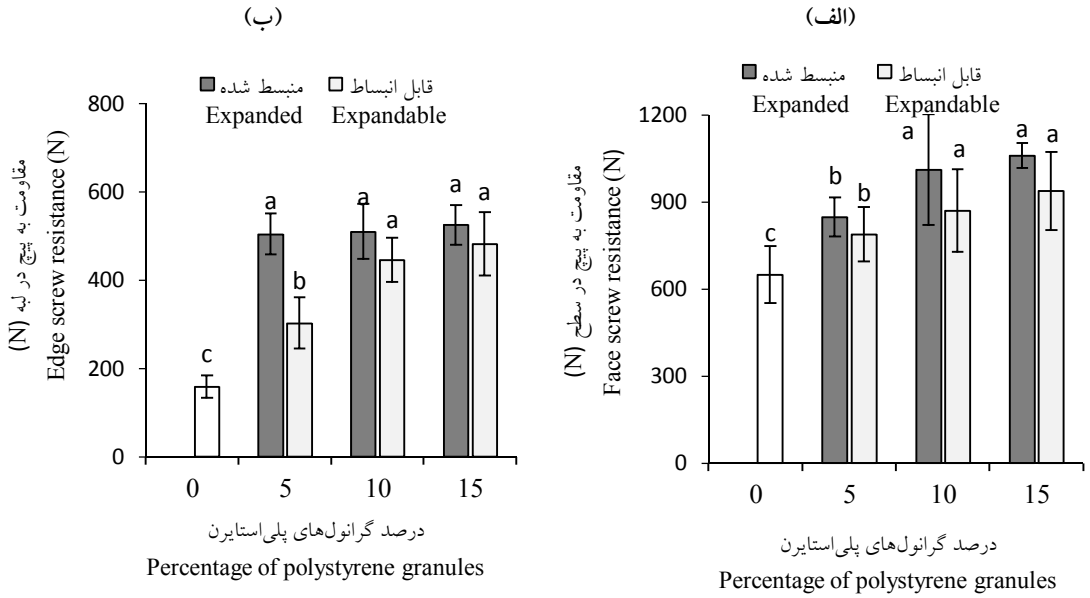

**شکل ٤- تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلی‌استایرن بر چسبندگی داخلی چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن.**

**Figure 4. The effect of type and percentage of polystyrene granules on the internal bond of hybrid-lightweight panels.**

نتایج هم‌چنین نشان می‌دهند که میزان چسبندگی داخلی در نمونه‌های حاوی گرانول‌های از پیش‌منبسط‌شده تا حدودی بیش‌تر از نمونه‌های حاوی گرانول‌های قابل انبساط است. گرانول‌های منبسط‌شده نسبت به گرانول‌های قابل‌انبساط توده حجمی بالاتری دارند. این موضوع بالاتر بودن ضخامت کیک مواد در تخته‌های حاوی گرانول‌های منبسط‌شده را به همراه داشته که منجر به افزایش ضریب فشردگی و درهم‌رفتگی مواد لایه میانی در هنگام پرس تخته را به همراه داشته است (۱). لازم به ذکر است که این افزایش ضریب فشردگی مواد تأثیری بر دانسیته نهایی تخته‌ها ندارد. همچنین با افزایش مقدار گرانول‌های پلی‌استایرنی میزان درهم‌رفتگی مواد و پرکنندگی فضاهای خالی بیش‌تر شده است که تأثیر مثبتی بر میزان چسبندگی داخلی نمونه‌ها نیز نشان داد. پژوهشگران مختلف در مطالعات خویش میزان چسبندگی داخلی پانل‌های سبک‌وزن را متأثر از شدت درهم‌رفتگی مواد در لایه میانی و مقدار گرانول استفاده‌شده گزارش کرده‌اند (٦، ۹، ۱۵ و ۲۰).

**مقاومت به پیچ:** تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلیمری بر مقاومت به پیچ در سطح (الف) و لبه نمونه‌ها (ب) در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق بر نتایج، مقاومت به پیچ در سطح با افزایش درصد گرانول‌های پلیمری برای هر دو نوع گرانول مصرفی (از پیش‌منبسط‌شده و قابل‌انبساط) افزایش یافته است. نتایج هم‌چنین بیانگر اختلاف جزئی و غیرمعنی‌دار در مقاومت به پیچ سطح برای هر دو نوع گرانول (از پیش‌منبسط‌شده و قابل‌انبساط) می‌باشد. البته مقاومت به پیچ در سطح و لبه نمونه‌ها با استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرنی با افزایش معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد همراه بوده است. افزایش توده مواد موجود در لایه میانی و هم‌چنین شدت درهم‌رفتگی مکانیکی گرانول‌ها با خرده‌چوب‌ها دلیل این موضوع بوده است. پژوهشگران نیز بیان داشته‌اند که مقاومت به پیچ

در سطح نمونه‌ها به دانسیته لایه‌های سطحی نمونه‌ها، اندازه ذرات و هم‌چنین شدت درهم‌رفتگی مواد در لایه میانی بستگی دارد (۲ و ۱۷). افزایش درصد گرانول‌ها نیز افزایش ضریب فشردگی و درهم‌رفتگی مواد را به همراه داشته است که با افزایش مقاومت به پیچ در نمونه‌ها همراه بوده است.



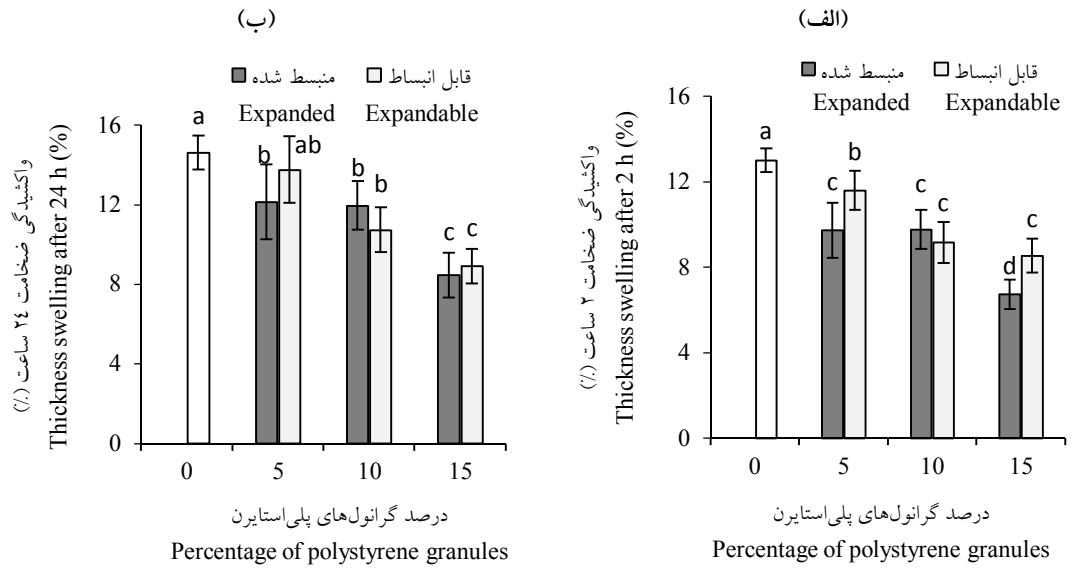

**شکل ۵- تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلیمری بر مقاومت به پیچ چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن؛ الف) مقاومت به پیچ در سطح نمونه‌ها، ب) مقاومت به پیچ در لبه نمونه‌ها.**

**Figure 5. The effect of type and percentage of polystyrene granules on the screw withdrawal resistance of hybrid-lightweight panel; A) Face screw resistance, B) Edge screw resistance.**

شکل ۵ (ب) نیز بیانگر افزایش چشمگیر مقاومت به پیچ در لبه نمونه‌های حاوی گرانول‌های پلی‌استایرنی نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. مقاومت به پیچ لبه در نمونه شاهد حدود ۱۶۰ نیوتن و در نمونه حاوی ۱۵ درصد گرانول به حدود ۵۰۰ نیوتن رسیده است که افزایش حدود ۳ برابری را نشان می‌دهد. مقاومت به پیچ در لبه نمونه‌ها به‌شدت درهم‌رفتگی مواد در لایه میانی بستگی دارد که در صورت استفاده از گرانول‌های پلی‌استایرنی درهم‌رفتگی مواد در لایه میانی افزایش می‌یابد (۱۶ و ۲۰). نتایج هم‌چنین بیانگر عدم تغییر مقاومت به پیچ لبه نمونه‌ها در درصدهای بالاتر گرانول (۱۰ و ۱۵ درصد) با تغییر نوع گرانول‌های مصرفی بوده است.

**واکشیدگی ضخامت:** تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلیمری بر درصد واکشیدگی ضخامت نمونه‌ها بعد از ۲ (الف) و ۲۴ ساعت (ب) غوطه‌وری در آب در شکل ۶ ارائه گردیده است. واکشیدگی ضخامت با افزایش درصد گرانول‌ها از ۰ تا ۱۵ درصد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. البته این تفاوت و کاهش معنی‌دار در مقایسه تیمار شاهد با تیمارهای ۱۰ و ۱۵ درصد گرانول مشهودتر است. درصد واکشیدگی ضخامت بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در نمونه شاهد حدود ۱۴ درصد و در نمونه با ۱۵ درصد گرانول حدود ۹ درصد مشاهده شد. نکته قابل‌توجه عدم اثرگذاری معنی‌دار نوع گرانول (منبسط‌شده و قابل‌انبساط) مصرفی بر درصد واکشیدگی ضخامت

می‌باشد. اختلاف درصد واکشیدگی ضخامت بین نمونه‌های حاوی گرانول‌های از پیش منبسط‌شده و قابل‌انبساط بعد از ۲ و ۲٤ ساعت غوطه‌وری کم و در حدود ۱ درصد مشاهده شد. مقدار واکشیدگی ضخامت در سازه‌های چوبی به مقدار ماده چوبی و آب‌دوست بودن مواد مورداستفاده بستگی دارد (۱٤). لازم به ذکر است که گرانول‌های پلی‌استایرنی در این پژوهش جایگزین خرده‌چوب در لایه میانی گردیده‌اند. با حذف خرده‌چوب از لایه میانی تخته و جایگزینی آن با گرانول‌های پلی‌استایرنی، هم ماده چوبی که عامل اصلی در واکشیدگی ضخامت می‌باشد از لایه میانی کم شده است و هم مقدار قابل‌توجهی از گرانول‌های پلی‌استایرنی در لایه میانی جایگزین شده است که دسترسی آب و رطوبت را به خرده‌چوب‌ها محدودتر می‌کند (۱۵). گرانول‌های پلی‌استایرنی آب‌گریز بوده و درنتیجه واکشیدگی ضخامت را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند (٤ و ۵). با افزایش درصد گرانول‌های پلیمری نیز مقدار خرده‌چوب بیش‌تری حذف شده است و بنابراین واکشیدگی ضخامت به‌طور قابل‌ملاحظه‌تری کاهش یافته است.

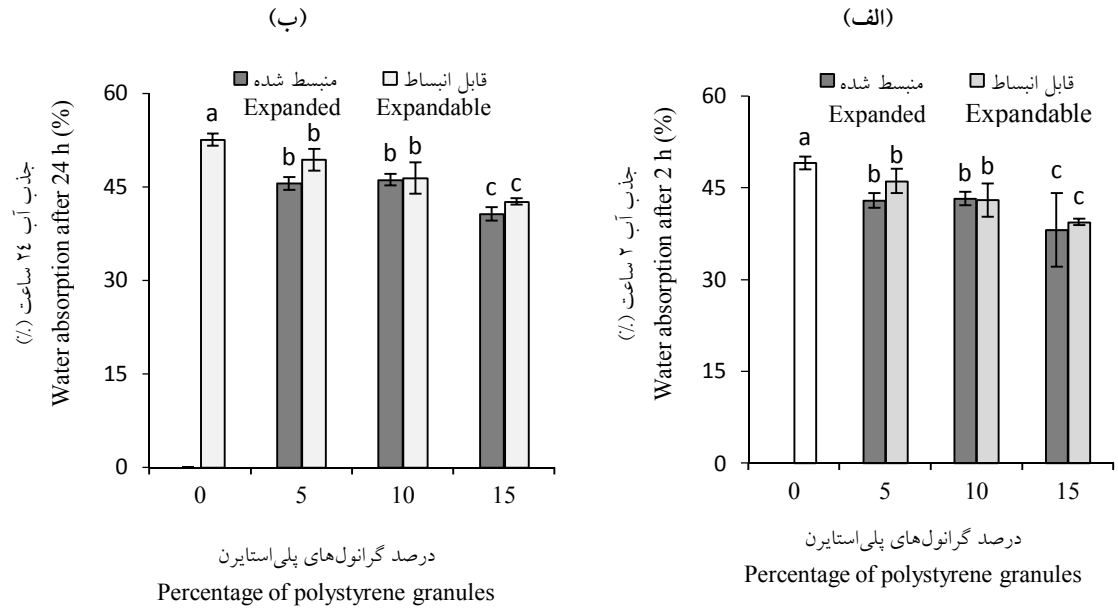



**شکل ٦- تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلیمری بر واکشیدگی ضخامت چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن؛ الف) بعد از ۲ ساعت غوطه‌وری، ب) بعد از ۲٤ ساعت غوطه‌وری.**

**Figure 6. The effect of type and percentage of polystyrene granules on the thickness swelling of hybrid-lightweight panel; A) After 2 hours of immersion, B) After 24 hours of immersion.**

**جذب آب:** تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلیمری بر درصد جذب آب بعد از ۲ (الف) و ۲٤ ساعت (ب) غوطه‌وری در آب در شکل ۷ ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند نتایج حاصل از درصد جذب آب مشابه روند نتایج درصد واکشیدگی ضخامت می‌باشد. نتایج بیانگر کاهش حدود ۲۰ درصدی در میزان جذب آب نمونه‌های حاوی گرانول‌های پلی‌استایرنی نسبت به نمونه شاهد می‌باشند. با افزایش درصد گرانول‌های پلیمری از صفر تا ۱۵ درصد، مقدار جذب آب برای هر دو نوع گرانول از پیش‌منبسط‌شده و قابل‌انبساط بعد از ۲ و ۲٤ ساعت غوطه‌وری در آب به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. درصد جذب آب نمونه شاهد بعد از ۲٤ ساعت حدود ۵۲ درصد و برای نمونه با ۱۵ درصد گرانول حدود ٤۰ درصد مشاهده شد.

همان‌طور که ذکر گردید، ویژگی‌های فیزیکی سازه‌های چوبی به مقدار ماده چوبی و آب‌دوست بودن چوب است (۱٤). تخته‌های سبک‌وزن دارای خلل و فرج زیادی در لایه میانی خود می‌باشند که با افزودن گرانول‌های پلی‌استایرن در لایه میانی بخش زیادی از خلل و فرج پر شده و دسترسی آب به خرده‌چوب را محدود می‌کند (۱ و ۲۰). هم‌چنین به‌دلیل آب‌گریز بودن گرانول‌های پلی‌استایرنی، گرانول‌ها مانند یک پوشش برای خرده‌های چوب عمل نموده و رسیدن آب و رطوبت به آن‌ها را با تأخیر مواجه می‌سازد (٤ و ۹). نتایج هم‌چنین نشان دادند که نوع گرانول‌های پلی‌استایرنی (از پیش منبسط‌شده و قابل‌انبساط) بر درصد جذب آب تفاوت اندکی داشته است.




**شکل ۷- تأثیر نوع و درصد گرانول‌های پلیمری بر جذب آب چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن؛ الف) بعد از ۲ ساعت غوطه‌وری، ب) بعد از ٢٤ ساعت غوطه‌وری.**

**Figure 7. The effect of type and percentage of polystyrene granules on the water absorption of hybrid-lightweight panel; A) Water absorption after 2 h, B) Water absorption after 24 h.**

## نتیجه‌گیری

نتایج بیانگر تأثیر مثبت افزودن گرانول‌های پلی‌استایرنی به‌عنوان پرکننده در لایه میانی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پانل‌ها بوده است. افزایش درصد گرانول‌های پلی‌استایرنی افزایش معنی‌دار چسبندگی داخلی و مقاومت به پیچ سطح نمونه‌ها و همچنین کاهش درصد واکشیدگی ضخامت و جذب آب نمونه‌ها را به همراه داشته است. البته مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت به پیچ در لبه نمونه‌ها خیلی متأثر از افزایش درصد گرانول‌های پلی‌استایرنی در لایه میانی تخته‌ها نبوده است. مصرف کم‌تر گرانول‌های پلی‌استایرنی از نقطه‌نظر اقتصادی و کاهش هزینه‌های تولید بسیار دارای اهمیت است. همچنین مقایسه نوع گرانول‌های از پیش‌منبسط‌شده و قابل‌انبساط نشان داد که به‌استثنای مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تفاوت خیلی زیادی در نوع گرانول مصرفی نداشتند. ازاین‌روی استفاده از

گرانول‌های قابل‌انبساط، با توجه به حذف مرحله پیش منبسط شدن آن‌ها و هم‌چنین افزایش بهره‌وری چسب به‌علت کاهش سطح ویژه گرانول‌ها در مرحله چسب‌زنی، برای تولید چندسازه‌های چوبی سبک‌وزن توصیه می‌شود.

## منابع


1. Dziurka, D., Mirski, R., and Trojanski, A. 2013. Characteristics of lightweight particleboards with the core layer supplemented with rape straw and expanded polystyrene. Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology. 82: 2. 250-254.
2. Eckelman, C.A. 1975. Screw holding performance in hard woods and particleboard. Forest Product J. 25: 6. 30-35.
3. Gale, R.F., and Yeoman, R.G. 1987. Triboard testing. Engineering technology, past and present: papers prepared for the conference, Institution of Professional Engineers, May 10-14, New Zealand, Volume 1: 235-241.
4. Horvath, J.S. 1994. Expanded polystyrene (EPS) geofoam: an introduction to material behavior. Geotext Geomembr. 13: 4. 263-280.
5. Hosseini, S.M., Khazaeian, A., and Tabarsa, T. 2019. Study of electrical and acoustic properties of lightweight wood-based panels products with polystyrene granules. J. of Wood & Forest Science and Technology. 26: 2. 63-74.
6. Jafarnezhad, S., Shalbafan, A., and Luedtke, J. 2018. Effect of expandable and expanded granules diameter on the properties of hybrid-lightweight panels. Forest and Wood Products. 70: 4. 719-728.
7. Klasterka, S. 2003. Device and method for dispersing particles in order to form a nonwoven. European Patent Office (EP1140447B1). 16p.
8. Meinlschmidt, P., Schrip, A., Dix, B., Thole, V., and Brinker, N. 2008. Agriculture residues with light paranchyma cells and expandable filler materials for the production of lightweight particleboards. International Panel Products Symposium, Espoo, Finland.
9. Mir, S., Farrokhpayam, S.R., Nazerian, M., and Mansouri, H.R. 2016. Light weight particle board using expanded polystyrene. J. of Wood and Forest Science and Technology. 22: 4. 239-253.
10. Monteiro, S., Martins, J., Magalhães, F.D. and Carvalho, L. 2017. Lightweight wood composites: challenges, production and performance. P 293-332. In: S., Kalia (eds). Springer Series in Polymers and Composites, Springer Verlag.
11. O'Brien, M., and Bringezu, S. 2017. What is a sustainable level of timber consumption in the EU: Toward global and eu benchmarks for sustainable forest use. Sustainability. 9: 5. 1-18.
12. Paoletti, S., Spinelli, M., and Amico, M. 2012. The European Market for RTA Furniture. Centre for Industrial studies (CSIL). Milano, MI,Italy, 187p.
13. Sackey, E.K., Zhang, C., Tsai, Y.L., Prats, A., and Smith, G.D. 2011. Feasibility of a new hybrid wood composite comprising wood particles and strands. Wood and Fiber Science. 43: 1. 11-20.
14. Schulz, T., and Hanel, W. 2010. Leichtezutaten (Light ingredients) (In German) HK, Holz- Kunstst. Verarb. 45: 6. 75-77.
15. Seemann, C. 2011. New generation of wood-based materials; it does not always have to be wood, In GreCon Woodsymposium, Hannover, Germany, 15-16 September.
16. Shalbafan, A., Tackmann, O., and Welling, J. 2016. Using of expandable fillers to produce low density particleboard. European J. of Wood and Wood Products. 74: 1. 15-22.
17. Shalbafan, A., Jafarnezhad, S., and Luedtke, J. 2018. Evaluation of low density hybrid panels using expandable granules: effect of granules diameter and content. European J. of Wood and Wood Products. 76: 1505-1514.

18. Teischinger, A. 2010. The development of wood technology and technology developments in the wood industries from history to future. European J. of Wood and Wood Products. 68: 3. 281-287.

19. Thoemen, H., Irle, M., and Sernek, M. 2010. Wood-based panels; an introduction for specialist. BrunelUniv. Press, London, England, 283p.

20. Weinkoetz, S. 2012. Kaurit-light for lightweight wood-based panels, in: 2nd Symposium on lightweight furniture, Lemgo, Germany.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
*J. of Wood & Forest Science and Technology, Vol. 27 (1), 2020*
*http://jwfst.gau.ac.ir*
*DOI: 10.22069/jwfst.2020.17803.1860*

# Effect of the polystyrene granules type and content on the physical and mechanical properties of the lightweight wood-based panels

**S. Jafarnezhad Sani[1], *A. Shalbafan[2] and J. Luedtke[3]**
[1]M.Sc. Student, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Tarbiat Modares University, I.R. Iran,
[2]Assistant Prof., Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Tarbiat Modares University, I.R. Iran,
[3]Assistant Prof., Bio-Based Resources and Materials, Thünen-Institute of Wood Research, Hamburg, Germany
Received: 03.13.2020; Accepted: 05.07.2020

**Abstract**
**Background and Objectives:** Nowadays, production of wood-based panels with lower density (about 25% lower compared to those conventional panels) gained more interest all over the world due to increased price of raw wood and the market needs for lightweight panels. Several methods and materials were used to produce lightweight panels in recent years. Among all, using of light and voluminous materials like polymeric granules have attracted more interest to reduce the panels density. Simultaneous use of the unique properties of two or more conventional wood products can influence the final characteristics of the lightweight wood-based panels. The aim of the current study was the production of lightweight wood-based panels using wood fiber as the surface layers and a mixture of wood particles and polystyrene granulate as the core layer. A comparative study was done to see the effect of two types of polystyrene granules (expandable and pre-expanded granules) and the granules percentage on the physical and mechanical properties of the lightweight wood-based panels.

**Materials and Methods:** Hybrid-lightweight panels (520 kg/m$^3$) were produced using wood fiber as surface layers and a mixture of wood particles and polystyrene granulate as core layer. For constructing the panels, two kinds of the granules (pre-expanded and expandable granules) were used with different percentage (5, 10 and 15% based on oven dry mass of wood coarse particles). In this study, mechanical (bending strength, modulus of elasticity, internal bond, and screw withdrawal resistance) and physical properties (thickness swelling and water absorption) of the panels were evaluated.

**Results:** The results showed that the physical and mechanical properties of panels were improved using polystyrene granules compared to that of reference panels (no granules). The modulus of elasticity was nearly doubled in case of pre-expanded granules, while other properties were nearly the same. Increasing the granules content up to 15 percent has a significant effect on the internal bond value, edge screw withdrawal resistance and physical properties (thickness swelling and water absorption). Thickness swelling and water absorption were significantly reduced with substitution of wood particles with polystyrene granules.

**Conclusion:** The results showed that with increasing of polystyrene granules, the internal bond and screw withdrawal resistance were improved. The results also showed that the granules types (expandable and pre-expanded granules) had no significant influence on the panels' properties, except the modulus of elasticity and internal bond. As final conclusion, using of expandable granules can be favored for panels' production due the elimination of pre-expansion process and increased binder effectiveness.

***Keywords:*** Lightweight, Particle, Polystyrene granule, Urea formaldehyde, Wood panel

*Corresponding author: ali.shalbafan@modares.ac.ir