



University of Tehran

Evaluation of different types of wood glue derived from waste polystyrene foam in plywood manufacturing

Habib Noori¹ | Ali Shalbafan^{2*} | Saeed Kazemi-Najafi³

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: habibnoori@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: ali.shalbafan@modares.ac.ir
3. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: skazemi@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 01 June 2025
Revised: 03 August 2025
Accepted: 11 August 2025
Published online: 16 September 2025

Keywords:
Compatibilizer,
Melting,
Plywood,
Recycling.

ABSTRACT

This study investigated the production of plywood from poplar veneers and polymer films derived from waste polystyrene foam. The adhesive was prepared in four forms: film obtained by melting the foam, film obtained by dissolving the foam in the natural solvent d-limonene without compatibilizer, film obtained by dissolving the foam in d-limonene with compatibilizer (styrene maleic anhydride at 5%), and the original foam used directly as adhesive. The properties of the polymer films and polystyrene foam (as reference) were evaluated by measuring melt index, molecular weight, and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The results showed that the melt index of the polymer films increased significantly with the addition of compatibilizer, as well as through dissolution and melting, while the average molecular weight decreased. FTIR analysis revealed structural changes and the appearance or intensification of several peaks due to dissolution, melting, and compatibilizer addition. Plywood bonded with polymer films, with or without compatibilizer, exhibited better physical and mechanical properties than panels bonded with unprocessed foam. Overall, plywood made with polymer film obtained by dissolving foam in limonene was suitable for indoor use according to EN 314-2. Panels bonded with polymer film containing 5% compatibilizer also achieved shear strength exceeding the standard requirement (1 MPa), indicating potential suitability for outdoor applications.

Cite this article: Noori, H., Shalbafan, A., Kazemi-Najafi, S. (2025). Evaluation of different types of wood glue derived from waste polystyrene foam in plywood manufacturing. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (2), 177-190. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.393908.1346>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.393908.1346>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

ارزیابی شکل‌های مختلف چسب حاصل از فوم پلی‌استایرن ضایعاتی در ساخت تخته‌لایه

حبیب نوری^۱ | علی شالبافان^{۲*} | سعید کاظمی نجفی^۳

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: habibnoori@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: ali.shalbafan@modares.ac.ir

۳. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: skazemi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:

بازیافت،

تخته‌لایه،

ذوب،

سازگارکننده.

در این مطالعه، به بررسی ساخت تخته‌لایه از لایه‌های گونه چوبی صنوبر و چسب گرمانرم حاصل از فوم بازیافتی پلی‌استایرن پرداخته شده است. چسب مورد استفاده در چهار شکل مختلف شامل فیلم حاصل از ذوب فوم، فیلم حاصل از انحلال فوم در حلال طبیعی دی‌لیمون بدون سازگارکننده، فیلم حاصل از انحلال فوم در حلال دی‌لیمون با سازگارکننده (استایرن مالئیک انیدرید و در سطح ۵ درصد) و فوم در شکل اولیه خود به‌عنوان چسب، مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های شاخص جریان مذاب، وزن مولکولی و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری (FTIR) فیلم‌های پلیمری و فوم پلی‌استایرن بررسی شد. براساس نتایج، شاخص جریان مذاب فیلم‌های پلیمری به‌ترتیب با افزوده شدن ماده سازگار کننده، انحلال و ذوب فوم به‌طور قابل توجهی افزایش و میانگین‌های وزن مولکولی کاهش یافت. نتایج FTIR نشان‌دهنده تغییرات ساختاری، ایجاد و افزایش شدت برخی پیک‌ها با توجه به انحلال، ذوب و استفاده از سازگار کننده در چسب می‌باشد. نتایج نشان داد که تخته‌های ساخته شده با فیلم پلیمری با و بدون ماده سازگارکننده، خواص فیزیکی و مکانیکی بهتری نسبت به سایر شکل‌های استفاده از فوم پلی‌استایرن داشته است. به‌طور کلی، تخته‌لایه ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از انحلال فوم در لیمون طبق استاندارد EN314-2 برای کاربردهای داخل ساختمان مناسب برآورده شد. در نمونه تخته‌لایه ساخته شده با فیلم پلیمری حاوی ۵ درصد سازگار کننده نیز مقاومت برشی فراتر از الزامات استاندارد (حداقل ۱ مگاپاسکال) است و پتانسیل به‌کارگیری در فضای خارج از ساختمان را دارد.

استناد: نوری، حبیب، شالبافان، علی، کاظمی نجفی، سعید (۱۴۰۴). ارزیابی شکل‌های مختلف چسب حاصل از فوم پلی‌استایرن ضایعاتی در ساخت تخته‌لایه. نشریه جنگل و فرآورده‌های

چوب، ۷۸ (۲)، ۱۹۰-۱۷۷. DOI: <https://10.22059/jfwf.2025.393908.1346>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.393908.1346>



۱. مقدمه

طبق داده‌های منتشر شده توسط فائو میزان تولید تخته‌لایه در حدود ۱۱۰ میلیون مترمکعب است که معمولاً برای تولید تخته‌لایه، از رزین‌های گرماسخت بر پایه فرمالدهید به‌ویژه اوره و فنل فرمالدهید استفاده می‌گردد [۱]. هر چند چسب اوره فرمالدهید پرکاربردترین چسبی است که برای تولید انواع اوراق فشرده چوبی برای کاربردهای داخل ساختمان به‌کار برده می‌شود، اما چالش اصلی آن در مقایسه با سایر رزین‌ها، انتشار فرمالدهید از محصول ساخته شده می‌باشد که برای سلامت انسان بسیار خطرناک گزارش شده است [۲]. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی برای کاهش انتشار فرمالدهید صورت گرفته است، اما با توجه به سختگیری‌های بیشتر در این زمینه، تولیدکنندگان علاقمند به استفاده از چسب‌های جایگزین غیرفرمالدهیدی می‌باشند. پلیمرهای گرمانرم شاخه‌ای از چسب‌های غیرفرمالدهیدی است که معمولاً به شکل ورق یا فیلم برای تولید تخته‌لایه و یا نوع پودری آن برای تولید تخته‌خرده‌چوب مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸]. به‌عنوان نمونه، Cui و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از پلاستیک‌های ضایعاتی فروشگاه‌ها به‌عنوان چسب، تخته‌لایه‌های مناسب برای مصارف داخل ساختمان تولید کردند [۸].

پلی‌استایرن، حدود ۵ تا ۶ درصد از کل تولید پلاستیک در مقیاس جهانی را تشکیل می‌دهد و به‌عنوان سومین پلیمر پرکاربرد پس از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن نام برده شده است [۹]. با توجه به کاربرد فراوان و گسترده این پلیمر در مصارف مختلف، سالانه مقادیر زیادی ضایعات تولید می‌شود که مدیریت این حجم از ضایعات از نقطه‌نظر ملاحظات محیط زیستی بسیار حائز اهمیت است. دفع یا سوزاندن پلی‌استایرن ضایعاتی منجر به نفوذ مواد شیمیایی و انتشار گازهای سمی مانند COx، NOx و SOx به محیط‌زیست می‌گردد و بنابراین از ترجیح محیط‌زیستی برخوردار نیست [۱۰]. این در حالی است که بازیافت، می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر و سودمند در مدیریت این ضایعات مورد توجه قرار گیرد. از جمله روش‌های بازیافت فوم پلی‌استایرن می‌توان به فشرده‌سازی، ذوب و انحلال اشاره کرد. در فرآیند انحلال می‌توان پلیمر بازیافتی را حتی از انواع دیگر زباله‌ها، مواد افزودنی و پلیمرها بسته به ماهیت شیمیایی و غیر محلول بودن آنها جدا کرد [۱۱].

حلال‌های مختلفی برای انحلال پلی‌استایرن پیشنهاد شده است، اما حلال‌های آروماتیک (تولون، بنزن، زایلن) معمولاً به‌دلیل پارامتر قطبیت و سرعت بالای حلالیت، بیشتر استفاده شده‌اند [۱۲]. دی‌لیمون^۱ یک ترپن طبیعی و زیست‌تخریب‌پذیر موجود در پوست مرکبات^۲ است که به‌عنوان جایگزینی سازگار با محیط‌زیست برای انحلال پلی‌استایرن گزارش شده است. مطابق بررسی‌ها، لیمون حتی قدرت حل‌کنندگی بیشتری نسبت به تولون برای پلی‌استایرن دارد [۱۳].

برای بهبود سازگاری بین پلیمرهای گرمانرم و ماده چوبی از عوامل سازگار کننده^۳ مانند کوپلیمرهای پیوندی استفاده می‌کنند. رایج‌ترین کوپلیمرهای پیوندی مورد استفاده، پلی‌اولفین‌ها می‌باشند، زیرا این عوامل سازگار کننده می‌توانند با واکنش استریفیکاسیون بین انیدرید مالئیک و هیدروکسیل در الیاف چوبی، برهمکنش سطحی قوی بین پلیمر و الیاف چوبی ایجاد کنند [۱۴]. در تحقیقات انجام گرفته در خصوص کاربرد فوم پلی‌استایرن در ساخت تخته‌لایه، تنها از خود فوم به‌عنوان چسب استفاده شده است [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸] که با توجه به حجم بالای فوم قرار گرفته بین لایه‌های چوبی در هنگام پرس کردن، چالش‌های متعدد فرآیندی با خود به‌همراه دارد. هدف این پژوهش، ارزیابی قابلیت استفاده از شکل‌های مختلف استفاده از فوم‌های ضایعاتی پلی‌استایرن به‌عنوان چسب غیر فرمالدهیدی برای ساخت تخته‌لایه بود. بنابراین از ورقه‌های پلیمری حاصل از ذوب فوم، انحلال فوم در دو حالت همراه با سازگار کننده و بدون سازگار کننده و فوم پلی‌استایرن در شکل اصلی خود، به‌عنوان چسب بین لایه‌های چوبی استفاده شد.

^۱ D-limonene^۲ Citric fruits^۳ Coupling agent

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد مورد استفاده

۲-۱-۱. ماده اولیه چوبی

لایه‌های چوبی لوله‌بری شده صنوبر به ضخامت اسمی ۲/۲ میلی‌متر از شرکت افرا روکش ایرانیان خریداری و پس از انتقال به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک شدند. سپس لایه‌های خشک شده با رطوبت میانگین 8 ± 0.5 درصد به ابعاد 300×300 میلی‌مترمربع برای ساخت تخته‌لایه برش زده و لایه‌های بدون ترک، پیچ‌خوردگی و تغییر رنگ برای ساخت تخته‌لایه‌های آزمایشی انتخاب شدند.

۲-۱-۲. فوم پلی‌استایرن

فوم پلی‌استایرن بازیافتی با دانسیته ۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب (دانسیته کم) که پرکاربردترین فوم برای بسته‌بندی اجناس و کالاهای است، از شرکت پلی‌استایرن انبساطی سهند تهیه شد.

۲-۱-۳. حلال دی‌لیمون

این حلال با همکاری شرکت آبتین شیمی اصفهان و از پوست پرتقال تهیه گردید. آنالیز اسانس استخراج شده از پوست پرتقال با آزمون GC-MS نشان داد که بیش از ۹۵ درصد از این اسانس حاصل، ماده دی‌لیمون می‌باشد.

۲-۱-۴. ماده سازگار کننده

ماده سازگار کننده استایرن مالئیک انیدرید^۱ از شرکت هلندی Polyscope با نام تجاری Xiran 6000 v1 پیوند شده با نسبت پلی‌استایرن به انیدرید ۶ به ۱ و به‌صورت پودر تهیه گردید.

۲-۲. ساخت فیلم (ورق) پلی‌استایرن

مراحل ساخت فیلم پلیمری عبارت بودند از: انحلال فوم‌ها به ابعاد حدودی $3 \times 3 \times 3$ سانتی‌متر در لیمون (با نسبت وزنی ۱ به ۱ فوم به حلال) با دستگاه همزن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، پخش فوم حل شده به روی سطح صاف پوشیده با فویل آلومینیومی، تبخیر لیمون در آون در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد (نقطه جوش لیمون) به مدت ۳۰ دقیقه، جدا کردن فیلم پلیمری از فویل آلومینیومی و در نهایت بررسی یکنواختی فیلم به دست آمده. ضخامت فیلم‌های پلیمری به دست آمده به‌طور میانگین 0.2 میلی‌متر بود. برای ساخت فیلم‌های پلیمری حاوی سازگار کننده، ۵ درصد سازگار کننده بر اساس وزن خشک فوم پلی‌استایرن به محلول لیمون - پلی‌استایرن اضافه گردید. برای تولید فیلم پلیمری حاصل از ذوب فوم پلی‌استایرن، از یک قالب فلزی استفاده شد. بدین‌منظور مقدار مورد نیاز از فوم در داخل قالب ریخته شد و قالب در آون با دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد تا ذوب شدن فوم قرار داده شد.

۲-۳. فرآیند ساخت تخته‌لایه

تخته سه لایه آزمونی به ابعاد $6 \times 300 \times 300$ سانتی‌متر (ضخامت، عرض، طول) با آرایش لایه‌های متقاطع و استفاده از پرس گرم مجهز به سیستم خنک کننده با آب ساخته شدند. دمای پرس ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد، نسبت وزنی حلال به فوم ۱ به ۱، فشار ویژه پرس ۲ مگاپاسکال و زمان پرس گرم ۵ دقیقه تنظیم شد. چهار تیمار این تحقیق عبارت بودند از ساخت نمونه‌های تخته‌لایه ۱- با فیلم پلیمری حاصل از انحلال فوم پلی‌استایرن در حلال لیمون بدون سازگار کننده، ۲- با فیلم پلیمری حاصل از انحلال فوم پلی‌استایرن در حلال لیمون حاوی ۵ درصد سازگار کننده، ۳- با فیلم پلیمری حاصل از ذوب فوم پلی‌استایرن و ۴- با خود فوم پلی‌استایرن با ضخامت حدود ۳ سانتی‌متر به‌عنوان چسب بین لایه‌های چوبی. در تمامی حالت‌ها، مقدار مصرف چسب بین

¹ XIRAN® 6000, polystyrene: anhydride = 6:1; MW:10 kDa, powder

لایه‌های چوبی ثابت و برابر ۲۰۰ گرم بر متر مربع بوده است.

با توجه به ساخت ۳ تخته برای هر تیمار، در مجموع ۱۲ تخته آزمایشگاهی ساخته شد. برای هر آزمون فیزیکی و مکانیکی نیز حداقل ۳ نمونه آزمونی از هر تخته ($n=9$) در نظر گرفته شد. نمونه‌های تهیه شده قبل از آزمون به مدت دو هفته در شرایط استاندارد محیطی (رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد و دمای 20 ± 3 درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند. تخته‌ها پس از متعادل‌سازی برای انجام آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی برش خورده و آزمون شدند. لازم به ذکر است، رفتار فیلم پلی‌استایرن در دماهای مختلف مورد ارزیابی کیفی قرار گرفت و مشاهده گردید که فیلم پلیمری در دمای حدود ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد دارای حالت خمیری و چسبندگی به سطوح می‌باشد.

۲-۴. آنالیزهای تحلیلی

شاخص جریان مذاب (Melt flow index= MFI) پلی‌استایرن در اشکال مختلف و مورد نظر این تحقیق با استفاده از دستگاه SANTAM مدل SMF-300 مطابق با استاندارد ASTM D-1238-04 و وزن مولکولی با روش کروماتوگرافی ژل تراوایی (Gel Permeation Chromatography= GPC) با استفاده از دستگاه Breeze 2 HPLC اندازه‌گیری گردید. برای بررسی گروه‌های عاملی در فیلم‌های پلیمری، آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز با استفاده از دستگاه مدل Perkin Elmer Spectrometer (والتام، ایالات متحده آمریکا) انجام گرفت. برای طیف‌نگاری از نمونه‌ها، فیلم‌های پلیمری آسیاب و با تکنیک FTIR، طیف‌ها در محدوده ۴۰۰-۴۰۰۰ سانتی‌متر معکوس و با دقت ۴ سانتی‌متر معکوس اندازه‌گیری شدند.

۲-۵. ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی تخته‌لایه‌ها

ارزیابی کارایی فیلم‌های پلی‌استایرن و فوم پلی‌استایرن به‌عنوان چسب و کیفیت چسبندگی آنها نیز از طریق اندازه‌گیری مقاومت برشی نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN 314-1 محاسبه گردید. آزمون مقاومت برشی به ۳ صورت نمونه‌های خشک، نمونه‌های غوطه‌ور در آب با دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت و نمونه‌های غوطه‌ور در آب گرم با دمای 65 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت بوده است.

مقادیر مقاومت برشی (f_v) مطابق با استاندارد پس از انجام آزمون محاسبه شد و مطابق با استاندارد EN 314-2 درصدی شکست مشاهده شده در لایه‌های چوبی ثبت گردید. مطابق با این استاندارد و با توجه به میزان درصد شکست در چوب، حداقل و حداکثر مقاومت برشی مورد نیاز بین ۰/۲ تا ۱ مگاپاسکال است. مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته تخته‌لایه‌های تولید شده مطابق با استاندارد EN 310 در دو جهت موازی و عمود بر الیاف لایه‌های سطحی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی نمونه‌ها از دستگاه مکانیکی یونیورسال شرکت صنایع (تهران، ایران) استفاده شد.

۲-۶. ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی تخته‌لایه‌ها

برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی تخته‌لایه‌های ساخته شده، درصد واكشیدگی ضخامت نمونه‌های آزمونی مطابق با استاندارد EN 317 در بازه‌های زمانی کوتاه و بلندمدت (۲۴ و ۱۶۸ ساعت غوطه‌وری) انجام گرفت.

۲-۷. آنالیز آماری میانگین داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ صورت گرفت. همچنین نرمال بودن داده‌های تحقیق (آزمون نرمال بودن کولموگروف-اسمیرنوف) و همگنی واریانس داده‌ها و نیز معنی‌داری میانگین داده‌ها توسط آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه مورد سنجش قرار گرفت. گروه‌بندی میانگین داده‌ها در صورت معنی‌داری توسط آزمون Duncan انجام پذیرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها در سطح آماری ۵ درصد انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. شاخص جریان مذاب فیلم‌های پلیمری

این شاخص برای فوم پلی‌استایرن در منابع مختلف از حدود ۱ تا ۱۲ گرم در ۱۰ دقیقه گزارش شده است [۱۸]، که برای فوم مورد استفاده در این تحقیق حدود ۱/۹۳ گرم در هر ده دقیقه به دست آمد و با انحلال فوم پلی‌استایرن در دی‌لیمون به طور معنی‌دار تا ۱۴/۵۵ گرم در ۱۰ دقیقه افزایش یافت (جدول ۱). اساساً افزایش شاخص جریان مذاب نشان‌دهنده کاهش وزن مولکولی پلیمر و ویسکوزیته ماده است [۲۰-۲۱]؛ به طوری که زنجیره‌های پلیمری شکسته شده (تخریب شده) به دلیل وزن مولکولی کمتر، عموماً جریان‌پذیری بیشتری دارند. این احتمال نیز وجود دارد که تغییرات مشاهده شده در اثر استفاده از سازگار کننده، علاوه بر تغییرات فیزیکی در فیلم پلیمری، ناشی از تغییرات شیمیایی و واکنش‌پذیری گروه‌های عاملی (انیدرید) باشد. باید توجه داشت که شاخص جریان مذاب سازگارکننده‌ها بسیار بیشتر از پلیمرها است [۱۴]. بنابراین جایگزینی بخشی از پلیمر با سازگارکننده، به طور طبیعی شاخص جریان مذاب مخلوط حاصل را افزایش می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای وزن مولکولی و شاخص جریان مذاب فوم و فیلم‌های حاصل از بازیافت فوم پلی‌استایرن

پارامترهای شاخص جریان مذاب و وزن مولکولی	فوم پلی‌استایرن	فیلم پلیمری بدون سازگارکننده	فیلم پلیمری حاوی ۵ درصد سازگار کننده	فیلم حاصل از ذوب فوم
شاخص جریان مذاب (گرم در هر ۱۰ دقیقه)	۱/۹۳	۱۴/۵۰	۱۹/۸۱	۱۴/۰۵
میانگین عددی وزن مولکولی (دالتون)	۹۸۴۳۱	۵۳۵۰۱	۴۲۵۴۰	۷۸۳۱۶
میانگین وزنی وزن مولکولی (دالتون)	۲۴۳۱۷۴	۱۴۵۲۹۱	۱۳۷۶۹۳	۲۰۳۶۲۲
شاخص پراکندگی (-)	۲/۴۷	۲/۷۲	۳/۳۴	۲/۶

۳-۲. وزن مولکولی فیلم‌های پلیمری

میانگین عددی وزن مولکولی (Mn) فوم پلی‌استایرن، ۹۸۴۳۱ دالتون اندازه‌گیری شد که پس از حل شدن در لیمون حدود ۴۵ درصد کاهش یافت (جدول ۱). بیشترین درصد کاهش میانگین وزنی وزن مولکولی نیز در نمونه‌های حاوی ۵ درصد سازگارکننده پلیمری (۴۲۵۴۰ دالتون) با حدود ۵۶ درصد کاهش مشاهده شد. چنین روندی برای میانگین وزنی وزن مولکولی (Mw) فوم و فیلم‌های پلی‌استایرن حاصل از ذوب، انحلال در لیمون و حاوی سازگار کننده نیز مشاهده گردید. محققین دیگر نیز گزارش کردند که دلیل کاهش میانگین عددی و وزنی وزن مولکولی و افزایش شاخص پراکندگی، طول زنجیره‌های مولکولی فوم پلی‌استایرن در نتیجه انحلال در حلال‌های هیدروکربنی فقط زمانی اتفاق می‌افتد که برای تسریع در انحلال و یا تبخیر حلال از حرارت استفاده شده باشد [۱۱، ۲۲، ۲۳].

شاخص پراکندگی برای فوم پلی‌استایرن، ۲/۴۷ و برای فیلم حاصل از فوم حل شده در لیمون، حدود ۲/۷۲ بوده است. در صورت استفاده از سازگار کننده در فیلم پلیمری، شاخص پراکندگی وزن مولکولی به حدود ۴ رسید. سازگارکننده‌ها معمولاً زنجیره‌های پلیمری با طول خیلی کوتاه‌تری نسبت به پلیمرها دارند که این موضوع با کاهش وزن مولکولی و افزایش شاخص پراکنش وزن مولکولی، خود را نشان می‌دهد [۲۴]. میانگین وزنی وزن مولکولی فوم (Mw) و شاخص پراکندگی فوم پلی‌استایرن در سایر مقالات، به ترتیب ۲۴۲۱۴۲ دالتون و ۲/۹ گزارش شده که به مقادیر اندازه‌گیری شده در این مطالعه نزدیک هستند [۲۵].

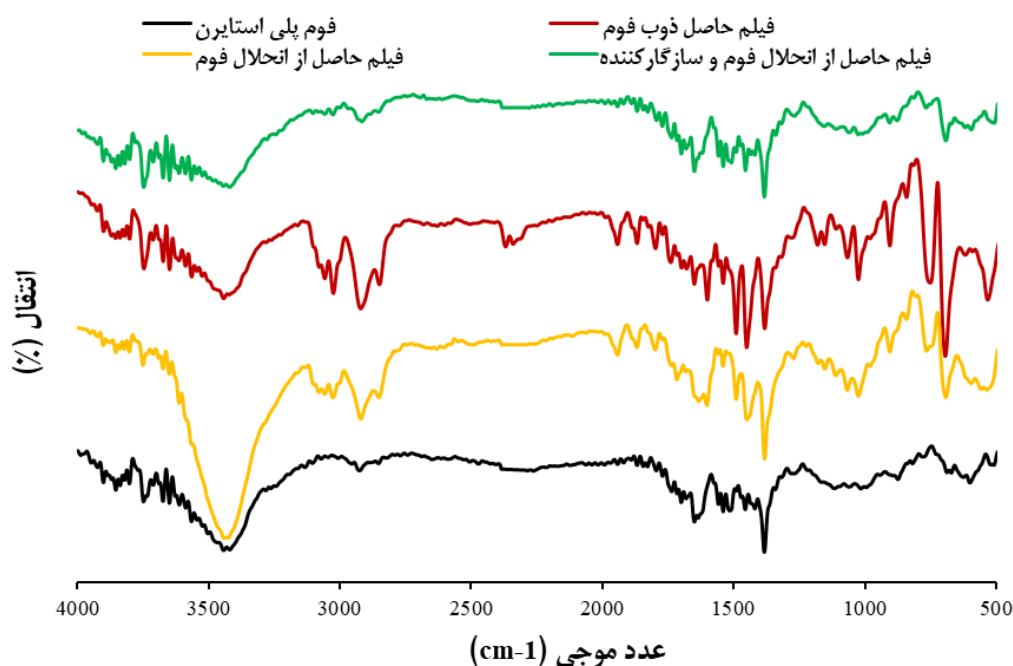
۳-۳. طیف‌سنجی مادون قرمز فیلم‌های پلیمری

نتایج مربوط به طیف‌سنجی مادون قرمز فوم پلی‌استایرن و فیلم‌های پلیمری حاصل از آن، در شکل یک نشان داده شده است. پیک‌های مشاهده شده در اعداد موجی ۱۶۰۰، ۱۴۵۶ و ۱۴۲۰ سانتی‌متر معکوس در فیلم‌های پلی‌استایرن، مربوط به تغییرات حلقه آروماتیکی فوم پلی‌استایرن ناشی از انحلال در لیمون گزارش شده است [۲۲]. همچنین براساس نتایج تحقیق Achilias و

همکاران (۲۰۰۹)، شدت پیک‌های محدوده ۳۰۰۰، ۱۵۰۰، ۷۵۰ و ۶۰۰ سانتی‌متر معکوس در فوم پلی‌استایرن پس از انحلال، افزایش پیدا کرده است، نتایجی مشابه با آنچه در این مطالعه به‌دست آمد [۲۳]. در مطالعات انجام شده، تشدید پیک‌ها پس از انحلال، به باقی ماندن مولکول‌های لیمونن در ساختار پلیمر، برهمکنش‌های شیمیایی و یا شکسته شدن احتمالی زنجیرهای پلیمر در اثر فرآیند انحلال نسبت داده شده است [۲۳]. Tawfik و همکاران (۲۰۱۷) بارزترین تفاوت بین طیف فوم پلی‌استایرن ضایعاتی و فوم حل شده در حلال‌های هیدروکربنی را به ظهور پیک‌های جدید در محدوده اعداد موجی ۱۷۹۰-۱۹۵۰ سانتی‌متر معکوس و تشدید پیک عدد موجی در محدوده ۱۵۹۶ سانتی‌متر معکوس منتسب کردند که در فیلم‌های پلیمری این تحقیق نیز مشاهده شد [۲۶].

همانطور که در شکل یک مشخص است، طیف‌سنجی مادون قرمز سازگارکننده پلی‌استایرن مالئیک انیدرید شامل نوارهای جذبی کششی C=O در محدوده ۱۶۵۰ تا ۱۷۵۰ سانتی‌متر معکوس و نوار جذبی خمشی در بازه ۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ سانتی‌متر معکوس قرار دارند و به ارتعاشات خمشی اتصالات مولکولی در پلی‌استایرن مالئیک انیدرید اشاره دارند. این مشاهدات با آنچه در منابع ذکر شده است نیز منطبق است [۲۷].

بررسی طیف‌سنجی فیلم حاصل از ذوب فوم پلی‌استایرن و مقایسه آن با فوم پلی‌استایرن نیز منجر به ایجاد تغییرات متعدد در پیک‌های FTIR شده است. محققان تشکیل گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل و افزایش شدت و ایجاد پیک‌ها در محدوده عدد موجی ۱۵۰۰ سانتی‌متر معکوس را نتیجه قرار گرفتن پلیمر پلی‌استایرن در معرض دمای بالا و وقوع اکسایش حرارتی ذکر کرده‌اند. همچنین شدت و مکان پیک‌های موجود در اعداد موجی ۶۹۲، ۷۵۵ و ۱۰۲۴ سانتی‌متر معکوس، به سمت نواحی آلیفاتیک خطی جابجا شده است [۲۶، ۲۲].



شکل ۱. نتایج مربوط به طیف‌سنجی مادون قرمز فوم پلی‌استایرن و فیلم‌های پلیمری حاصل از آن به‌عنوان چسب

۳-۴. نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های تخته‌لایه

نتایج تجزیه واریانس حاصل از سنجش ویژگی‌های مکانیکی نمونه تخته‌لایه‌های ساخته شده با فوم پلی‌استایرن و فیلم‌های پلیمری حاصل از بازیافت فوم پلی‌استایرن در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌غیر از ویژگی‌های خمشی عمود بر الیاف، در سطح آماری ۵ درصد، اختلاف‌های مشاهده شده بین میانگین بقیه ویژگی‌های مکانیکی معنی‌دار می‌باشند ($P < 0.05$).

جدول ۲: میزان معنی‌داری اثر استفاده از اشکال مختلف پلی‌استایرن به‌عنوان چسب بر ویژگی‌های مکانیکی تخته‌لایه‌های تولید شده (اعداد داخل جدول، مقادیر P می‌باشد)

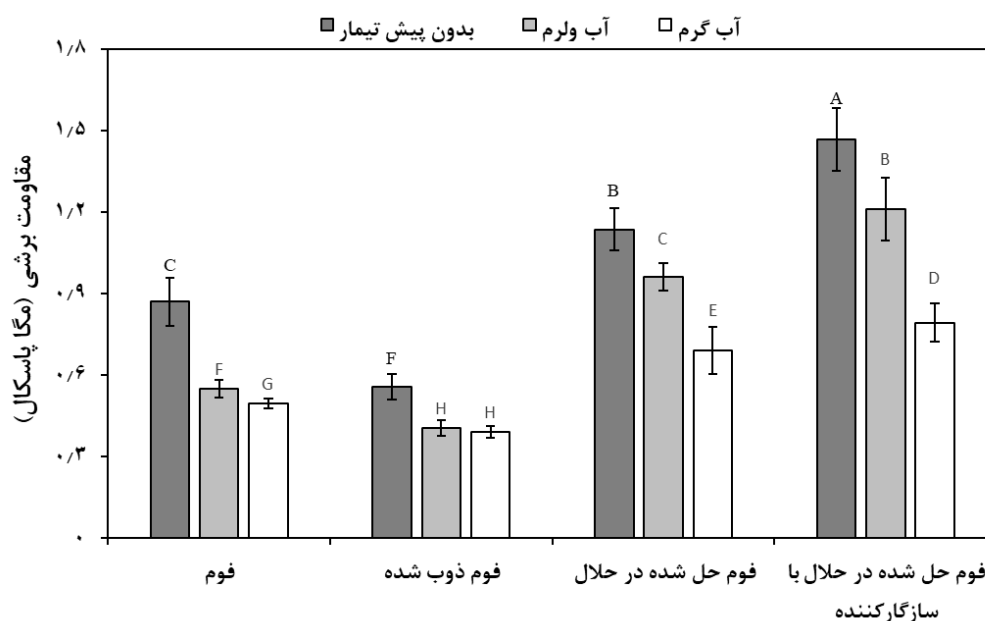
عامل متغیر	مدول گسیختگی		مدول الاستیسیته		مقاومت برشی			واکشی‌دگی ضخامت	
	عمود	موازی	عمود	موازی	خشک	آب ولرم	آب گرم	۲۴ ساعت	۱۶۸ ساعت
حالت‌های چسب	۰/۰۰۰**	۰/۴۲ ^{NS}	۰/۰۱۳**	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۰**

* معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد، ** معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد، NS: عدم معنی‌داری.

۳-۵. مقاومت برشی

میزان مقاومت برشی در تخته‌لایه ساخته شده با فیلم پلیمری حاوی ۵ درصد سازگار کننده، حدود ۳۰ درصد بیشتر از نمونه متناظر خود بدون ماده سازگار کننده بوده است (شکل ۲). براساس گزارش‌های علمی منتشر شده، پلی‌استایرن مالئیک انیدرید، قابلیت بهبود کشش سطحی بین پلیمر و چوب را دارد [۲۴]. گروه‌های کربونیل موجود در مالئیک انیدرید بسیار واکنش‌پذیر بوده و قابلیت برقراری پیوندهای استری با گروه‌های هیدروکسیل را دارا می‌باشند [۲۸] و سر دیگر زنجیره پلی‌استایرن مالئیک انیدرید نیز قابلیت درهم رفتگی فیزیکی با فیلم پلیمری را دارد [۲۹]. براساس آزمون FTIR، شدت پیک‌ها در اثر افزوده شدن سازگار کننده به فیلم پلیمری در محدوده اعداد موجی ۱۰۲۰، ۱۷۵۰ تا ۱۹۴۰، ۲۳۶۰، ۲۹۱۴ و ۳۴۲۰ سانتی‌متر معکوس کاهش پیدا کرده بود که می‌تواند بیانگر واکنش بین ماده سازگار کننده با پلی‌استایرن باشد. همچنین عدد موجی در محدوده ۱۶۵۰ سانتی‌متر معکوس در فیلم‌های پلیمری حاوی سازگار کننده پدیدار شد که مربوط به گروه عاملی $C=C$ موجود در ماده سازگار کننده می‌باشد [۳۰]. بنابراین افزایش مقاومت با استفاده از سازگار کننده را می‌توان به تغییرات گروه‌های عاملی در فیلم‌های پلیمری برای پیوندپذیری بهتر با گروه‌های هیدروکسیل چوب نیز نسبت داد. همچنین محققین گزارش کردند که دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌استایرن در نتیجه حضور ماده سازگار کننده، استایرن مالئیک انیدرید کاهش می‌یابد [۲۸]. همچنین عنوان شد که این اثر می‌تواند منجر به نرم‌شدگی بیشتر پلیمر پلی‌استایرن شده و در نتیجه درهم رفتگی‌های بیشتر و بهتری با ساختار سلولی چوب را به‌همراه داشته باشد. نتایج مربوط به میانگین عددی و وزنی وزن مولکولی و شاخص جریان مذاب نمونه‌های حاوی سازگارکننده پلیمری در این تحقیق نیز تأییدکننده این موضوع می‌باشد. مقاومت برشی در نمونه‌های ساخته شده با فیلم حاصل از انحلال در لیمون بدون سازگار کننده نیز افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی نسبت به فیلم حاصل از ذوب فوم را نشان داده است. طبق این نتیجه، فیلم حاصل از ذوب فوم، جریان‌پذیری کمتری در خط چسب داشته و در نتیجه نتوانسته است درهم رفتگی مکانیکی مناسبی با سلول‌های چوبی برقرار نماید. در مورد کمتر بودن مقاومت برشی نمونه‌های ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از ذوب فوم باید به تأثیر وزن مولکولی و دمای شیشه‌ای شدن پلیمرهای ذوب شده به‌صورت متقابل نیز توجه کرد.

میزان مقاومت برشی خشک در تخته‌لایه‌های ساخته شده با فوم پلی‌استایرن در این تحقیق، حدود ۰/۹ مگاپاسکال بوده که با نتایج گزارش شده در سوابق تحقیق نزدیک است. Demirkir و همکاران (۲۰۱۷)، مقاومت برشی خشک (بدون پیش تیمار) تخته‌لایه ساخته شده با فوم پلی‌استایرن به‌عنوان چسب و لایه‌های گونه چوبی صنوبر را حدود یک مگا پاسکال گزارش کردند [۶]. میزان مقاومت برشی در نتیجه غوطه‌وری نمونه‌ها در آب (آب ولرم و آب گرم) به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. نفوذ آب به لایه چسب و همچنین وارد شدن تنش‌های ناشی از تغییر ابعاد به خط چسب منجر به کاهش قابل توجه مقاومت برشی در نتیجه غوطه‌وری در آب است [۳۱]. البته شدت این کاهش برای نمونه‌های غوطه‌ور شده در آب گرم بیشتر از آب ولرم است. دلیل این موضوع هم احتمالاً مربوط به نرم‌شدن لایه چسب در نتیجه حرارت طولانی مدت (۶ ساعت) در دمایی نزدیک به دمای شیشه‌ای فیلم پلیمری می‌باشد [۱۹].



شکل ۲. مقاومت برشی نمونه تخته‌های تخته‌لایه ساخته شده با اشکال مختلف پلی‌استایرن به‌عنوان چسب

آنالیز سطح شکست نمونه‌ها و بررسی درصد سطح شکست در چوب می‌تواند قابلیت کاربردی نمونه‌ها برای مصارف مختلف را تعیین کند. آنالیز سطح شکست نمونه‌ها نیز نشان داد که بیشترین درصد شکست در چوب در تخته‌های ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از انحلال در لیمون بوده است (شکل ۳). نوع شکست نمونه‌های ساخته شده با فوم پلی‌استایرن و یا فیلم حاصل از ذوب فوم، بیشتر در خط اتصال چسب با چوب (شکست چسبندگی یا Adhesion failure) و یا شکست در خود چسب (Cohesion failure) بوده است. در سطح شکست، اکثر این نمونه‌ها چسب در هر دو سطح نمونه مشاهده می‌شود. این موضوع نیز نشان‌دهنده ضعف ساختاری چسب، جریان‌پذیری ناکافی فوم و یا فیلم حاصل از فوم ذوب شده در خط چسب و ایجاد اتصال ضعیف با سطح لایه‌های چوبی است. هر چند استفاده از ماده سازگار کننده باعث افزایش میزان مقاومت برشی در نمونه‌ها شده است، ولی این افزایش مقاومت خود را در درصد شکست در چوب نشان نداده است و احتمالاً شکست، بیشتر در ناحیه اتصال سازگار کننده با زنجیره پلیمر پلی‌استایرن اتفاق افتاده است. بر این اساس، این احتمال وجود دارد که با افزایش درصد ماده سازگار کننده که دارای وزن مولکولی کمتری نسبت به پلیمر پلی‌استایرن است و جایگزینی آن با بخشی از پلیمر اصلی، شکست در زنجیره‌های پلیمری به‌وجود آمده باشد. طبق برآوردها، درصد شکست در چوب نمونه‌های ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از انحلال در نمونه‌های بدون پیش تیمار، حدود ۶۰ درصد، در نمونه‌های ۲۴ ساعت شناورسازی در آب ولرم، حدود ۴۰ درصد و در نمونه‌های ۶ ساعت شناورسازی در آب گرم، حدود ۲۰ درصد می‌باشد. شکست در چوب در نمونه‌های ساخته شده با فوم در حالت‌های تیمار نشده حدود ۲۰ درصد و در سایر نمونه‌ها، درصد شکست در چوب در محدوده ۱۰ درصد مشاهده گردید.

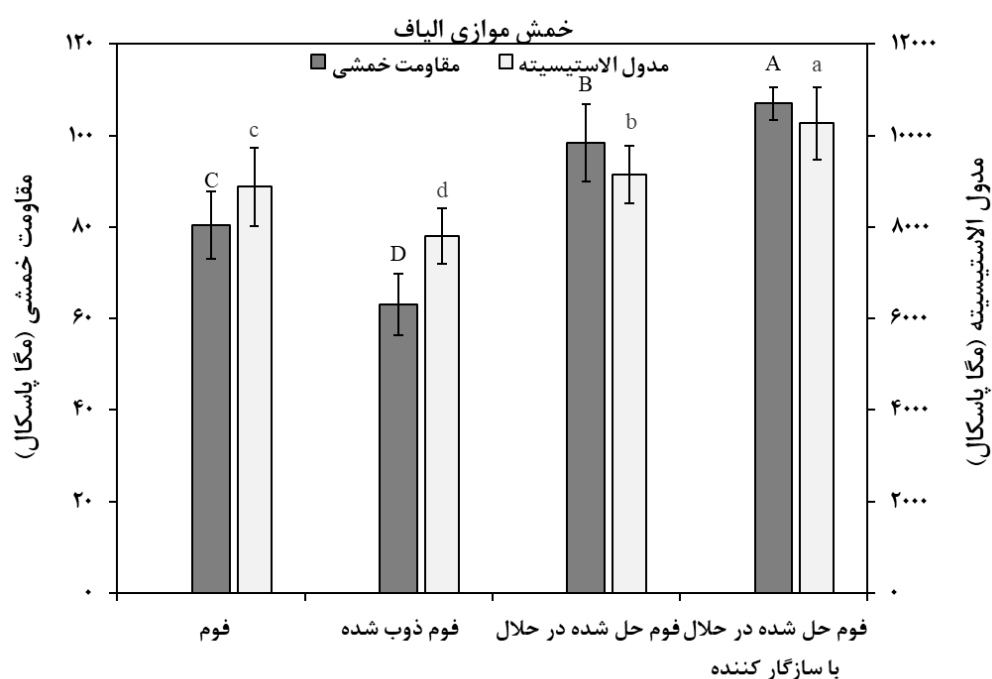
۳-۶. ویژگی‌های خمشی

مقاومت خمشی موازی الیاف در نمونه تخته‌لایه‌های ساخته شده با اشکال مختلف پلی‌استایرن به‌عنوان چسب، دارای اختلاف معنی‌دار آماری با یکدیگر می‌باشند (شکل ۴). کمترین میزان مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در نمونه‌های ساخته شده با فیلم حاصل از ذوب فوم پلی‌استایرن، به‌ترتیب ۶۳ و ۷۷۹۰ مگاپاسکال مشاهده شد. بیشترین میزان مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در نمونه‌های ساخته شده با استفاده از فیلم پلیمری حاوی سازگار کننده (به‌ترتیب ۱۰۷ و ۱۰۲۰۰ مگاپاسکال) مشاهده شد. نتایج به‌دست آمده در مورد فوم پلی‌استایرن (مقاومت خمشی، ۸۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته، ۸۸۷۸ مگاپاسکال) در این

تحقیق، بیشتر از نتایج ارائه شده از طرف سایر محققین بود به‌طوری که در پژوهش‌های صورت گرفته، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته تخته‌لایه ساخته شده با فوم پلی‌استایرن به‌عنوان چسب و لایه‌های گونه چوبی صنوبر، به‌ترتیب ۷۴ و ۵۵۷۲ مگاپاسکال گزارش شد [۶].

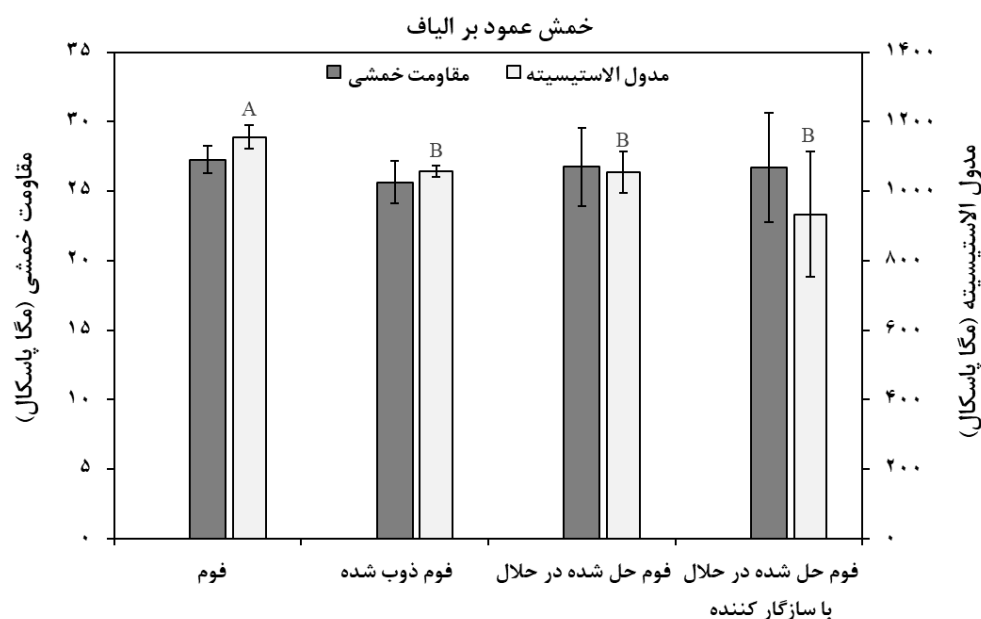


شکل ۳. سطح شکست نمونه‌ها بعد از آزمون مقاومت برشی تخته‌لایه‌های ساخته شده با اشکال مختلف پلی‌استایرن به‌عنوان چسب



شکل ۴. مقاومت خمشی موازی الیاف تخته‌لایه‌های ساخته شده با اشکال مختلف فوم پلی‌استایرن به‌عنوان چسب

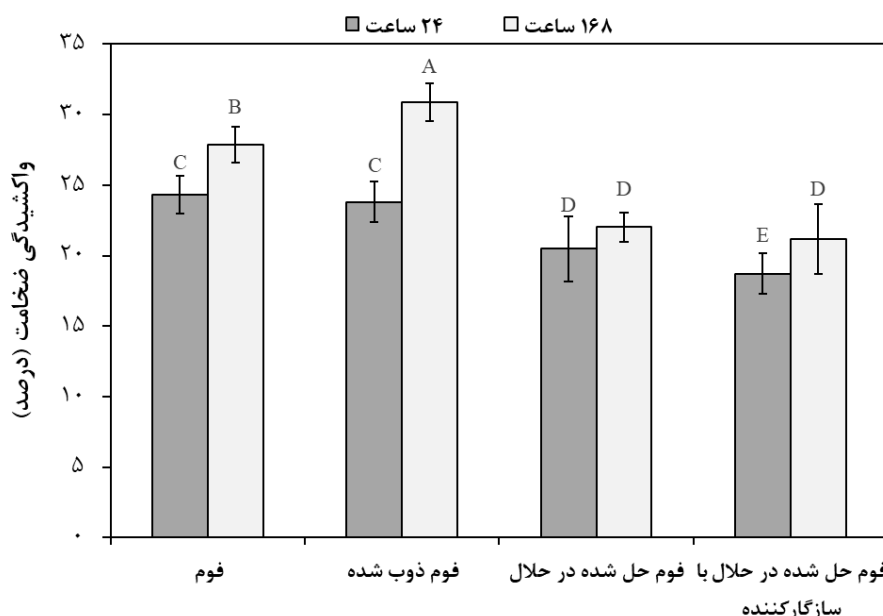
حالت‌های مختلف استفاده از پلی‌استایرن به‌عنوان چسب، تأثیر معنی‌داری بر مقاومت خمشی عمود بر الیاف نمونه‌ها نداشته است (شکل ۵). ضعف مقاومت لایه‌های چوبی در جهت عمود بر الیاف و شکسته شدن آنها پیش از اثرگذاری نوع و یا حالت چسب، محتمل‌ترین دلیل این نتیجه است. تنها مدول الاستیسیته در حالت عمود بر الیاف در نمونه‌های ساخته شده با فوم پلی‌استایرن، به‌طور معنی‌داری بیشتر از سه حالت دیگر است. در این خصوص، می‌توان به بیشتر بودن توده حجمی فوم اشاره کرد که منجر به افزایش ضریب فشردگی لایه‌های چوبی درون پرس گرم شده و در نتیجه باعث افزایش مدول الاستیسیته نیز به‌طور معنی‌داری شده است. براساس پژوهش‌های پیشین، ضریب فشردگی و دانسیته لایه‌های سطحی از جمله عوامل اصلی و اثرگذار بر مدول خمشی انواع اوراق فشرده چوبی هستند [۳۲].



شکل ۵. مقاومت خمشی عمود بر الیاف نمونه تخته‌های تخته‌لایه ساخته شده با اشکال مختلف پلی‌استایرن به‌عنوان چسب

۳-۷. ویژگی‌های فیزیکی

کمترین و بیشترین درصد واکنشیدگی ضخامت بعد از ۲۴ و ۱۶۸ ساعت غوطه‌وری در آب، به‌ترتیب در نمونه تخته‌های ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از انحلال در لیمونن حاوی سازگار کننده و فیلم پلیمری حاصل از ذوب فوم بوده است (شکل ۶). در حالی که درصد واکنشیدگی ضخامت در حالت غوطه‌وری ۲۴ ساعته، در نمونه تخته‌های ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از انحلال، اختلاف معنی‌دار آماری نشان نداد. همچنین درصد واکنشیدگی ضخامت بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در نمونه تخته‌های ساخته شده با فوم و فیلم حاصل از ذوب فوم، از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند، اما با افزایش زمان غوطه‌وری در آب (۱۶۸ ساعت) اختلاف مشاهده شده معنی‌دار شد. همان‌طور که در بخش نتایج مربوط به مقاومت برشی و چسبندگی داخلی بحث شد، فیلم پلیمری حاصل از انحلال فوم در لیمونن جریان‌پذیری بیشتری در خط چسب داشته و ضمن نفوذ بیشتر توانسته اتصال‌های مکانیکی قوی‌تری با سطح چوب برقرار کند. این موضوع، ضمن مهار تنش‌های ناشی از تغییر ابعاد چوب و کاهش درصد واکنشیدگی ضخامت در نتیجه غوطه‌وری در آب، منجر به نفوذ و جذب آب کمتر درون حفرات چوب نیز شده است [۱۴]. لازم به ذکر است که جداسدن بین لایه‌ها در هیچ یک از نمونه‌های این تحقیق در حالت غوطه‌وری در آب حتی بعد از گذشت ۱۶۸ ساعت مشاهده نشد که این موضوع با توجه به پایداری خط چسب در زمان‌های طولانی غوطه‌وری بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۶. درصد واکشی‌دگی ضخامت نمونه تخته‌لایه‌های ساخته شده با اشکال مختلف پلی‌استایرن به‌عنوان چسب

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تأثیر حالت‌های مختلف استفاده از پلی‌استایرن به‌عنوان چسب (فوم پلی‌استایرن، فیلم پلیمری حاصل از ذوب فوم، فیلم پلیمری حاصل از انحلال فوم در لیمون بدون و به همراه سازگار کننده) بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی تخته‌لایه بررسی شد. بیشترین و کمترین مقاومت برشی و مقاومت خمشی موازی الیاف به‌ترتیب در نمونه ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از انحلال فوم و دارای ماده سازگارکننده و فیلم پلیمری حاصل از ذوب فوم بوده است. همچنین تخته‌های حاصل از فیلم پلیمری حاصل از انحلال، ویژگی‌های فیزیکی بهتری نسبت به دو حالت دیگر استفاده از پلی‌استایرن داشته است. هر چند زنجیره‌های پلیمری پلی‌استایرن در هر دو حالت انحلال و ذوب فوم تخریب شده بودند و میانگین عددی و وزنی وزن مولکولی آنها نیز حتی نسبت به فوم کاهش یافته بود، ولی به‌دلیل سایر تغییرات صورت گرفته در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پلیمر که اثرگذار بر جریان‌پذیری پلیمر در خط چسب است، عملکرد بهتری در فیلم پلیمری ناشی از انحلال مشاهده شد. البته مدول الاستیسیته تخته‌های ساخته شده با فوم پلی‌استایرن بالاتر بود که ناشی از افزایش ضریب فشردگی مجموع لایه‌ها هنگام پرس این نمونه‌ها بوده است. به‌طور کلی، تخته‌لایه ساخته شده با فیلم پلیمری حاصل از انحلال فوم در لیمون طبق استاندارد EN314-2 برای استفاده داخلی مناسب برآورده شد. در نمونه تخته‌لایه ساخته شده با فیلم پلیمری حاوی ۵ درصد سازگار کننده نیز مقاومت برشی فراتر از الزامات استاندارد، و پتانسیل به‌کارگیری در فضای خارج از ساختمان، مشاهده گردید.

References

- [1] Bekhta, P., Chernetskyi, O., Kusniak, I., Bekhta, N. & Bryn, O. (2021). Selected properties of plywood bonded with low-density polyethylene film from different wood species. *Polymers*, 14(1), 51.
- [2] Salthammer, T., Mentese, S. & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536-2572.
- [3] Mo, X., Zhang, X., Fang, L. & Zhang, Y. (2021). Research progress of wood-based panels made of thermoplastics as wood adhesives. *Polymers*, 14(1), 98.
- [4] Lin, T., Guo, W., Gao, L., Chang, L. & Wang, Z. (2011) Effect of particle size on properties of cotton stalk-recycled plastic composites. *Journal of Southwest Forestry University*, 31(5), 78-82.

- [5] Yu, P.J., Zhang, W., Chen, M.Z. & Zhou, X.Y. (2020). Plasma-treated thermoplastic resin film as adhesive for preparing environmentally friendly plywood. *Journal of Forestry Engineering*, 5(1), 41-47.
- [6] Demirkır, C., Öztürk, H. & Çolakoğlu, G. (2017). Effects of press parameters on some technological properties of polystyrene composite plywood. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 17(3), 517-522.
- [7] Bekhta, P., Müller, M. & Hunko, I. (2020). Properties of thermoplastic-bonded plywood: Effects of the wood species and types of thermoplastic films. *Polymers*, 12(11), 2582.
- [8] Cui, T., Song, K.L. & Zhang, S. B. (2010). Research on utilizing recycled plastic to make environment-friendly plywood. *Forestry Studies in China*, 12(4), 218-222.
- [9] Lisperguer, J., Bustos, X. & Saravia, Y. (2011). Thermal and mechanical properties of wood flour-polystyrene blends from postconsumer plastic waste. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(1), 443-451.
- [10] Prabhakar, R.P., Sanket, S.S., Rauphunnisa, F.I. & Rahul, B.P. (2016). Impacts of thermocol waste on marine life: a review. *International Multidisciplinary Research Journal*, 3(0), 60-68.
- [11] García, M.T., Duque, G., Gracia, I., de Lucas, A. & Rodríguez, J.F. (2009). Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11(0), 2-5.
- [12] Gutiérrez, C., García, M.T., Gracia, I., de Lucas, A & Rodríguez, J.F. (2013). The selective dissolution technique as the initial step for polystyrene recycling. *Waste and Biomass Valorization*, 4(1), 29-36.
- [13] Soulimani, R., Bouayed, J. & Joshi, R.K. (2019). Limonene: natural monoterpene volatile compounds of potential therapeutic interest. *American Journal of Essential Oils & Natural Products*, 7(4), 01-10.
- [14] Kayemi-Najafi, S. (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review. *Waste Management*, 33(9), 1898-1905.
- [15] Del Menezzi, C., Nakamura, A.P., Queiroy, F. & Couto, M. (2017). Physical and mechanical properties of teakwood LVL bonded with expanded polystyrene. *Pro Ligno*, 13(4), 194-198.
- [16] Del Menezzi, C. H. S., Nakamura, A., Queiroz, F. & Couto, M. (2016). Preliminary evaluation of laminated veneer lumber bonded with expanded polystyrene. *European Journal of Wood & Wood Products*, 74(5), 759-761.
- [17] Ozturk, H., Demir, A., Demirkır, C. & Colakoglu, G. (2019). Effect of veneer drying process on some technological properties of polystyrene composite plywood panels. *Drvna Industrija*, 70(4), 369-376.
- [18] Grigsby, W.J., Puri, A., Gaugler, M., Lüedtko, J. & Krause, A. (2020). Bonding wood veneer with biobased poly (Lactic Acid) thermoplastic polyesters: potential applications for consolidated wood veneer and overlay products. *Fibers*, 8(8), 50.
- [19] Samper, M.D., Garcia-Sanoguera, D., Parres, F. & López, J. (2010). Recycling of expanded polystyrene from packaging. *Progress in Rubber Plastics & Recycling Technology*, 26(2), 83-92.
- [20] Barrera, M.A., Vega, J.F., Aguilar, M. & Martínez-Salazar, J. (2006). Melt flow index on high molecular weight polyethylene: A comparative study of experiments and simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 174(1-3), 171-177.
- [21] Kayemi-Najafi, S., Mostafazadeh-Marznaki, M., Chaharmahali, M. & Tajvidi, M. (2009). Effect of thermomechanical degradation of polypropylene on mechanical properties of wood-polypropylene composites. *Journal of Composite Materials*, 43(22), 2543-2554.
- [22] Ebciba, C. & Gnanamani, A. (2020). Detailed studies on microbial adhesion and degradation of polystyrene foam wastes (PSFW) for clean environment. *Environmental Science & Pollution Research*, 27(35), 44257-44266.
- [23] Achilias, D.S., Giannoulis, A. & Papageorgiou, G.Z. (2009). Recycling of polymers from plastic packaging materials using the dissolution–reprecipitation technique. *Polymer Bulletin*, 63(3), 449-465.
- [24] Shalbafan, A., Benthien, J.T., Welling, J. & Barbu, M.C. (2013). Flat pressed wood plastic composites made of milled foam core particleboard residues. *European Journal of Wood & Wood Products*, 71(6), 805-813.

- [25] Abdel-Hakim, A., El-Basheer, T.M., Abd El-Aziz, A.M. & Afifi, M. (2021). Acoustic, ultrasonic, mechanical properties and biodegradability of sawdust/recycled expanded polystyrene eco-friendly composites. *Polymer Testing*, 99, 107215.
- [26] Tawfik, M.E., Eskander, S.B. & Nawwar, G.A. (2017). Hard wood-composites made of rice straw and recycled polystyrene foam wastes. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(18).
- [27] Pavia, D.L., Lampman, G.M., Kriz, G.S. & Vyvyan, J.A. (2008). Introduction to Spectroscopy (4th editio). Belmont, California: Cengage Learning.
- [28] Ling, S.L., Koay, S.C., Chan, M.Y., Tshai, K.Y., Chantara, T.R. & Pang, M.M. (2020). Wood plastic composites produced from postconsumer recycled polystyrene and coconut shell: effect of coupling agent and processing aid on tensile, thermal, and morphological properties. *Polymer Engineering & Science*, 60(1), 202-210.
- [29] Felix, J.M., & Gatenholm, P. (1991). The nature of adhesion in composites of modified cellulose fibers and polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 42(3), 609-620.
- [30] Poletto, M., Dettenborn, J., Zeni, M., & Zattera, A.J. (2011). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Waste Management*, 31(4), 779-784.
- [31] Fang, L., Chang, L., Guo, W.J., Chen, Y. & Wang, Z. (2014). Influence of silane surface modification of veneer on interfacial adhesion of wood-plastic plywood. *Applied Surface Science*, 288(), 682-689.
- [32] Thoemen, H., Irle, M. & Sernek, M. (2010) Wood-based panels: an introduction for specialists. Brunel University Press, London, UK.