مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال هفتم، شماره ۴، شماره پیاپی ۲۸، زمستان ۱۴۰۱
Vol. 7, No. 4, Issue No. 28
Winter 2023, Quarterly
صفحه ۳۱-۲۳

Iran Polymer Technology: Research and Development

کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف پشم گوسفند با کاربرد عایق‌های حرارتی و صوتی: از معرفی تا کاربرد

محسن صدرالدینی*

ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

الیاف پشم گوسفند به‌عنوان یک لیف طبیعی و دوست‌دار محیط‌زیست در میان تمام الیاف نساجی از جایگاه بسیار ویژه‌ای برخوردار است که دلیل آن خواص منحصربه‌فرد آن از جمله خواص عایق حرارتی بالا، عایق و جاذب مناسب صوت، خود خاموش‌شوندگی، مقاومت بالا در برابر شعله، وزن کم و استحکام بالا است. اگرچه الیاف پشم به‌طور سنتی در پوشاک و منسوجات کاربرد دارد، اما کاربردهای بسیار متنوع دیگری را نیز می‌توان برای آن قائل شد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای صنعتی الیاف پشم گوسفند استفاده به‌عنوان فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری با کاربرد عایق‌های حرارتی و جاذب‌های صوتی است. هدف این مقاله مروری معرفی الیاف پشم گوسفند و شناساندن آن به‌عنوان لیفی با عملکرد بالا به‌جای جایگزین طبیعی و ارزان قیمت برای الیاف پلیمری سنتزی است. در این راستا، تلاش شده است تا بررسی جامعی پیرامون کامپوزیت‌های پلیمر-پشم با کاربری عایق حرارتی و جاذب صوت انجام شود.

واژه‌های کلیدی:

الیاف
پشم گوسفند،
عایق حرارتی،
عایق صوتی،
جاذب صوت،
کامپوزیت پلیمری

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
m.sadroddini@urmia.ac.ir

۱ مقدمه

اصطلاح الیاف با کارایی بالا (High Performance Fiber) یا به اختصار HPF معمولاً به کاربردهای الیاف خارج از نقش سنتی آن‌ها در پوشاک و منسوجات مانند فرش و پرده اشاره دارد. برخی تعریف محدودتری برای HPF بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها شامل مدول بالا، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی یا حرارتی بالا ارائه کرده‌اند و الیاف طبیعی مانند پشم و پنبه را در این دسته قرار نداده‌اند [۱]. با این وجود، پشم لیفی منحصربه‌فرد و دارای خواص مطلوب بسیاری است که تولیدکنندگان الیاف مصنوعی علی‌رغم تمام پیشرفت‌های صورت گرفته هنوز قادر به تقلید کامل از آن نیستند. صنعت نساجی از طیف گسترده‌ای از الیاف حیوانات استفاده می‌کند که پشم گوسفند مهم‌ترین آن‌هاست. تولید جهانی پشم گوسفند تنها در سال ۲۰۱۱ حدود ۱/۰۷ میلیون تن بوده و هر ساله در حال افزایش است [۲]. علاوه بر نساجی، الیاف پشم دارای کاربردهای فنی متعددی برای پوشاک و منسوجات صنعتی مقاوم در برابر شعله، عایق‌های حرارتی و صوتی، غربالگری و مواد کامپوزیتی دارد [۳].

۲ طبقه‌بندی الیاف پشم گوسفند

به‌طورکلی، الیاف پشم بر اساس قطر متوسط الیاف به سه دسته: پشم ظریف (Fine Wool) (قطر کمتر از ۲۴/۵ میکرومتر)، پشم متوسط (Medium Wool) (قطر ۲۴/۶ تا ۳۲/۵ میکرون) و پشم درشت (Coarse Wool) (قطر بالاتر از ۳۲/۵ میکرون) طبقه‌بندی می‌شود. پشم ظریف و متوسط بیشتر برای کاربردهای نساجی استفاده می‌شود در حالی که پشم درشت برای پوشاک به کار نمی‌رود. پشم درشت تقریباً ۴۰٪ از کل تولید پشم را تشکیل می‌دهد که عمدتاً برای ساخت کفپوش (فرش و قالیچه)، نمد، مواد عایق، محصولات بسته‌بندی و ریسمان کاربرد دارد [۲]. مهم‌ترین نژاد گوسفند برای تولید پشم مرغوب، مرینوس است. این نژاد ابتدا از اسپانیا نشئت گرفت و حدود ۲۰۰ سال پیش به استرالیا معرفی شد و در نهایت گوسفندان برای تولید پشم با ویژگی‌های مطلوب ظرافت (Fineness)، طول، درخشندگی، چین خوردگی و رنگ توسعه یافتند [۴،۳].

۳ ترکیب شیمیایی الیاف پشم

پشم از پروتئینی به نام کراتین تشکیل شده که حاوی پنج عنصر اصلی کربن، اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن، گوگرد بوده و دارای ساختار مارپیچی α-helical است (جدول ۱). یکی از ویژگی‌های این کراتین‌های سخت، غلظت گوگرد بالاتر نسبت

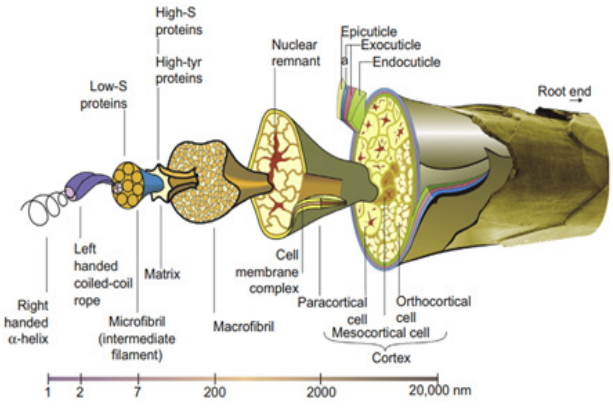
جدول ۱ ترکیب درصد شیمیایی میانگین الیاف پشم معمولی [۸].

عنصر	C	H	O	N	S
٪	۵۰	۷	۲۲–۲۵	۱۶–۱۷	۳–۴

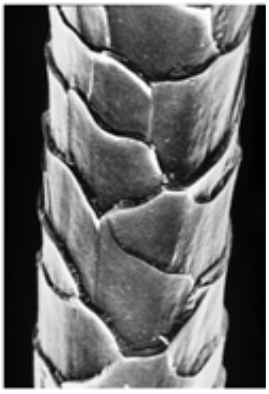
به کراتین‌های نرم، مانند کراتین‌های پوست است [۵]. الیاف پشم از مخلوط پیچیده‌ای از تقریباً ۱۷۰ پروتئین مختلف تشکیل شده است. واحدهای ساختاری اساسی پروتئین‌ها اسیدهای آمینه هستند. از ویژگی‌های شیمیایی پشم می‌توان به محتوای بالای کراتین خالص حاوی اسیدهای آمینه مانند گلیسین، آلانین، سرین، پرولین، نالین، سیستین، ایزومرهای لوسین، اسید آسپارتیک گلوتامیک اسید و ... اشاره کرد . به‌عبارت‌دیگر، پشم کوپلیمری از ۱۸ اسید آمینه است، در حالی که الیاف مصنوعی کوپلیمرهایی با دو مونومر هستند. محتوای مختلف اسیدهای آمینه در الیاف پشم به مزایای آن در خصوصیات شیمیایی کمک بسیار ویژه‌ای می‌کند. به‌عنوان مثال، سیستین حاوی گوگرد ویژگی مهم الیاف پشم است. مقدار گوگرد بالاتر در پشم به معنی مقاومت بالاتر در برابر اثرات شیمیایی و خواص فیزیکی–شیمیایی بالاتر است [۶،۷].

۴ ساختار الیاف پشم

همانند سایر الیاف پستانداران، پشم ترکیب زیستی متشکل از مناطقی با ترکیب فیزیکی و شیمیایی متفاوت است. طرح‌واره ساختار مورفولوژیکی پیچیده لیف پشم ظریف در شکل ۱ نشان داده شده است. الیاف ظریف پشم حاوی دو نوع سلول است: سلول‌های کوتیکول خارجی (External Cuticle Cells) و سلول‌های قشر داخلی (Internal Cortex) [۴]. الیاف



شکل ۱ طرح‌واره ساختار و مورفولوژی الیاف پشم مرینوس [۳].



شکل ۲ تصویر میکروسکوب الکترونی روبشی از لیف پشم مرینوس تمیز [۳].

پشم درشت، اغلب حاوی نوع سوم سلول (Medulla) نیز هستند که هسته مرکزی سلول‌ها را در امتداد محور لیف تشکیل می‌دهند. جزء اصلی لیف که ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی آن را تعیین می‌کند، قشر مغز (Cortex) است که از سلول‌های ارتوکورتیکال (Orthocortical) و پاراکورتیکال (Paracortical) تشکیل شده است [۱]. پوسته خارجی (Epidermis) نیز دارای سه لایه است: ۱- لایه بیرونی (اپیکوتیکول)، متشکل از اسیدهای آمینه α با فعالیت شیمیایی کم، ۲- لایه میانی (اگزوکوتیکل)، متشکل از کراتین غیربلوری و ۳- لایه داخلی (اندوکتیکول)، متشکل از پروتئین بسیار متبلور [۷].

سلول‌های کوتیکول یا فلس‌ها (Scales) که تقریباً ۱۰٪ از توده لیف را تشکیل می‌دهند، غلافی در اطراف قشر ایجاد می‌کنند. سلول‌های کوتیکول که هم در امتداد و هم در اطراف محیط هر لیف مانند کاشی‌های روی سقف همپوشانی دارند، به وضوح در میکروسکوپ نوری یا الکترونی روبشی دیده می‌شوند (شکل ۲). این ساختار، پشم را در میان الیاف نساجی منحصربه‌فرد می‌کند. سلول‌های کوتیکول مسئول توانایی پشم برای تبدیل شدن به نمد در شرایط مرطوب هستند [۹].

۵ مقاومت در برابر شعله (Flame Resistance) و خود خاموش شوندگی (Self-Extinguishing)

پشم بالاترین مقاومت در برابر شعله را میان تمام الیاف نساجی رایج دارد. مقاومت طبیعی بالای پشم در برابر شعله به‌دلیل ساختار شیمیایی و فیزیکی منحصربه‌فرد آن است. برخلاف سایر الیاف نساجی که عمدتاً از کربن و اکسیژن تشکیل شده‌اند، الیاف پشم دارای نسبت بالایی از نیتروژن و گوگرد است (جدول ۱). این امر عامل اصلی در دمای اشتعال بالای ۶۰۰-۵۷۰ °C و شاخص حدی اکسیژن (Oxygene Limitting Index) یا LOI برابر ۲۶-۲۵٪ است که برای فعال‌سازی احتراق لازم است و بالاتر از غلظت معمولی اکسیژن اتمسفر محیطی (۲۱٪) است. علاوه بر آن، پس از اشتعال، گرمای کم احتراق (۴/۹ kcal/g) و رطوبت زیاد (حدود ۱۵٪) پشم، انتشار آهسته شعله و خاموش شدن آسان آن را در پی دارد [۶،۱۰].

الیاف پشم همچنین بر خلاف الیاف گرمانرم مانند پلی‌استر در هنگام سوختن ذوب نمی‌شود. در الیاف پشم، لایه بیرونی سلول‌های کوتیکول توسط غشای سلولی با پیوندهای عرضی کم از قشر مغزی جدا می‌شود. هنگامی که الیاف گرم می‌شوند، سلول‌های کوتیکول تمایل به جدا شدن از قشر مغز دارند و به‌دلیل غلظت بالای گوگرد، زغال (Char) تولید می‌کنند که قسمت عمده لیف را از اکسیژن عایق می‌کند [۱۱]. علاوه بر آن، پشم هنگام سوزاندن ذرات و گازهای سمی منتشر نمی‌کند، البته پروانه‌ها یا انگل‌ها به پشم حمله می‌کنند و قبل از استفاده در ساختمان نیاز به تغییرات شیمیایی دارند [۱۲]. جدول ۲ مقایسه‌ای از انتقال‌های حرارتی (Thermal Transitions) الیاف بسیار رایج را نشان می‌دهد. با اصلاحات شیمیایی مختلف، الیاف پشم می‌توانند بازدارندگی شعله خود را افزایش دهند،

جدول ۲ مقایسه انتقال‌های حرارتی به‌عنوان بازدارندگی شعله الیاف گوناگون [۲].

لیف	T_p, °C pyrolysis	T_c, °C ignition	LOI, ٪	H_c kJg^{-1}
پشم	۲۴۵	۶۰۰	۲۵	۲۷
پنبه	۳۵۰	۳۵۰	۱۸/۴	۱۹
اکریلیک	۲۹۰	>۲۵۰	۱۸/۲	۳۲
پلی پروپیلن	۴۷۰	۵۵۰	۱۸/۶	۴۴
پلی استر	۴۴۷-۴۲۰	۴۸۰	۲۱-۲۰	۲۴

(الف) (ب) (ج)

شکل ۳ اشتعال‌پذیری کامپوزیت‌های پشم گوسفند (الف) قبل از اشتعال (ب) هنگام اشتعال (ج) پس از خود خاموش‌شوندگی [۲].

مانند عملیات فلوئوروشیمیایی که باعث افزایش مقاومت طبیعی در برابر لکه (Stain-Resistance) نیز می‌شود [۶].

مقاومت ذاتی پشم در برابر شعله، مقاومت بالایی در برابر شعله برای کامپوزیت‌ها نیز ایجاد می‌کند. در مطالعه‌ای توسط گونا و همکاران [۲]، تمام نمونه‌ها بلافاصله پس از اشتعال زغالی شده، بدون چکه کردن (Dripping) خاموش شدند (شکل ۳) که منجر به بالاترین درجه ضد حریق V-0 می‌شود. پشم به‌دلیل توانایی زغال‌شدن، سهم قابل‌توجهی در خاموش کردن شعله دارد، زیرا زغال مانع از انتشار شعله می‌شود. بر این اساس، پس از آزمایش سوختگی عمودی، نمونه متلاشی نشده و هیچ تغییر شکلی پیدا نکرد و شکل اولیه خود را حفظ کرده است. این جنبه می‌تواند به ویژه در کاربردهای داخلی مفید باشد، زیرا در بیشتر مواقع مواد سوختنی آتش را با سرعت بیشتری منتشر می‌کند.

۶ کاربرد پشم به‌عنوان ماده عایق

پشم ماده عایق کارامدی است که از دیرباز در لباس‌های بیرونی مانند کاپشن‌ها و کت‌های زمستانی استفاده می‌شود. پشم گوسفند به‌عنوان ماده جایگزین در ساختمان‌ها به‌عنوان عایق حرارتی و صوتی (عایق نما و سقف) یا در کامپوزیت‌ها با زمینه مختلف (پلیمری، خاکی یا سیمانی) در کشورهای غربی، به‌ویژه در اروپا و استرالیا رو به افزایش است [۱۳]. پشم دارای رسانایی گرمایی ۰/۰۴۳ W/mK و مقاومت گرمایی/توان عایقی ۰/۰۰۶۵ m^2K/W است که آن را برای طراحی کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنعت ساختمان یا عایق صوتی مفید می‌کند [۷]. پشم همچنین به عنوان عایق لرزش استفاده می‌شود [۱۴]. استفاده از چنین پشم‌های ضایعاتی، ماده رقابتی نسبت به مواد عایق معمولی ارائه می‌دهد و مزایایی را به توسعه اقتصادی و پایدار ساختمان‌های سبز اضافه می‌کند. بنابراین از منظر توسعه پایدار، انتخاب مواد خام با قابلیت بازیافت، تجدیدپذیربودن، در دسترس و سازگار با محیط‌زیست مانند چوب، خاک رس، سنگ، کاه، الیاف زیستی و پشم گوسفند مهم است، مشروط بر اینکه هرگونه فراوری بیشتر روی آن با مصرف کم انرژی انجام شود [۱۳].

۶-۱ عایق حرارتی

تقاضا برای مصالح ساختمانی سبز، به‌ویژه مواد عایق از منابع تجدیدپذیر، به طور روزافزون در حال افزایش است. کاربرد مواد طبیعی از منابع تجدیدپذیر با خواص فیزیکی و مکانیکی قابل مقایسه با مواد معمولی اهمیت بیشتری یافته است. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در علم و فناوری، می‌توان با اطمینان گفت که عایق‌های حرارتی ساخته‌شده از مواد طبیعی احتمالاً جایگزین مناسبی برای تخته‌های متداول ساخته‌شده از مواد مختلف مصنوعی (پشم معدنی، پلی‌استایرن یا پلی‌یورتان) خواهد بود. خواص تخته‌های عایق ساخته‌شده از الیاف آلی کاملاً با تخته‌های عایق معمولی ساخته شده از سایر مواد قابل مقایسه است [۱۵]. از طرفی، استفاده از مصالح طبیعی در ساختمان‌ها برای سلامت انسان مفید است. پلی‌استایرن منبسط شده (EPS) یکی از رایج‌ترین موادی است که امروزه به‌عنوان عایق حرارتی در ساختمان‌ها استفاده می‌شود و استفاده از آن با نگرانی‌های جدی ایمنی، زیست‌محیطی و بهداشتی مرتبط است، زیرا قابلیت اشتعال بسیار بالایی دارد و بخارات سمی تولید می‌کند [۸].

از منظر دیگر، می‌توان گفت که ساختمان‌ها منبع اصلی مصرف انرژی هستند. با این حال، با عایق حرارتی کافی ساختمان، مصرف سوخت ۵۰-۲۵٪ کاهش می‌یابد. هدایت حرارتی عامل مهمی در انتخاب نوع مواد عایق حرارتی است و در مورد این مواد مقدار آن کمتر از ۰/۶۵ W/mK است که توسط شاخص رومانیایی ۲/۱۰۷ C تعیین شده است. علاوه بر هدایت حرارتی کم، ماده عایق حرارتی مناسب با مقاومت حرارتی بیشتر از ۰/۵۰ m^2K/W مشخص می‌شود. پشم گوسفند به‌دلیل ریز حفره‌های ایجادشده میان الیاف و ساختار لوله‌ای الیاف، خاصیت عایق خوبی دارد. در فصول سرد به افزایش دمای داخلی کمک می‌کند و در فصل گرما دمای داخل ساختمان را پایین نگه می‌دارد [۱۶].

عایق پشمی معمولاً از الیافی ساخته می‌شود که یا به‌صورت مکانیکی یا با استفاده از ۱۵-۵٪ چسب بازیافتی پلی‌استر به

جدول ۳ مقاومت حرارتی (RSI)، مقدار R و چگالی عایق پشم برای پنج نژاد متفاوت گوسفند [۱۳].

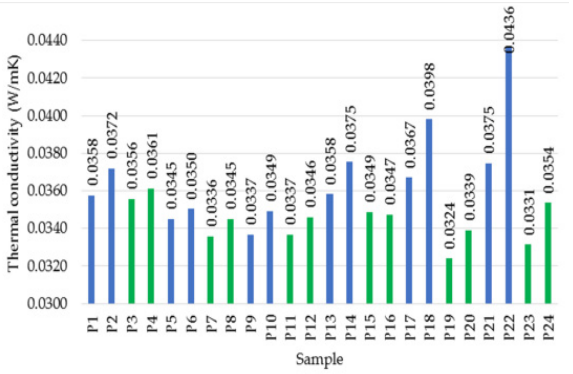
Properties	Romanov	Suffolk	North Country Cheviot	Commercial A	Commercial B
RSI (m^2K/W)	۰/۵۶	۰/۵۹۳۲	۰/۶۱۰۱	۰/۶۱۴۶	۰/۶۲۷۸
R value 25.4 mm (1")	۳/۵	۳/۷	۳/۸	۳/۸	۳/۸۹
Density (kg/m^3)	۲۲/۱	۲۲/۷	۲۳	۲۱/۹	۲۲

یکدیگر متصل می‌شوند تا خمیرها یا رول‌های عایق را تشکیل دهند. برخلاف الیاف شیشه، عایق پشمی را می‌توان بدون لباس محافظ نصب کرد زیرا باعث تحریک پوست، چشم یا مجاری تنفسی نمی‌شود. عایق پشم اغلب با بوراکس (Borax) اصلاح می‌شود تا خواص ضدآتش و دفع آفات آن افزایش یابد. در پژوهشی [۱۳] ارائه نتایج اولیه پروژه آزمایشی تولید عایق پشم که در آن مقیاس و اقتصاد تولید عایق پشم گوسفندی در نظر گرفته شده است، نتایج جالبی به‌دست آمد. میانگین نتایج آزمایش خواص حرارتی برای هر یک از نمونه‌ها با استفاده از روش آزمون استاندارد ASTM C1363 به‌دست آمد که در جدول ۳ قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که تنها تفاوت‌های جزئی در مقادیر عایق حرارتی و چگالی مواد میان نژادهای نمونه و نمونه نژادهای مخلوط تجاری وجود دارد. جدول ۳ مقادیر R، RSI و چگالی عایق پشم را بر اساس نژاد گوسفند فهرست می‌کند. نتایج تأیید می‌کنند که عایق پشم دارای مقادیر RSI بیشتر از حداقل مورد نیاز در آیین‌نامه ساختمانی Nova Scotia، است. عملکرد عایق پشم با مقادیر گزارش‌شده در منابع پژوهشی با سایر مواد مانند عایق الیاف شیشه، پلی استایرن و سلولزی قابل مقایسه است.

در پژوهش دیگری توسط دنس و همکاران [۱۶] مواد کامپوزیتی عایق حرارتی بوم‌شناختی و پایدار (Sustainable) مبتنی بر پشم گوسفند را از منظر هدایت حرارتی مورد مطالعه قرار داده‌اند. کامپوزیت‌ها با استفاده از دو نوع پیونددهنده (Binder) تهیه شدند: رزین اکریلیک-پلی‌یورتان و لاتکس لاستیک طبیعی که با روش‌ها و درصدهای مختلف روی الیاف پشم اعمال شدند (شکل ۴). به‌منظور بررسی تغییرات هدایت حرارتی، پارامترهای ضخامت، چگالی، نوع و درصد پیونددهنده در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد مقدار هدایت حرارتی نمونه ها در بازه ۰/۰۳۲۴-۰/۰۴۳۶ W/mK متغیر است (شکل ۵). مشخص شد که تمام نمونه‌های این مطالعه معیارهای ملی برای عملکرد حرارتی مواد عایق حرارتی را برآورده می‌کنند. پس از بررسی عمیق‌تر دو نمونه انتخاب شده، نتایج بیانگر ویژگی‌های جذب صدای خوب در محدوده بسامد در نظر گرفته شده نیز بودند [۱۶].

در پژوهش دیگری توسط کورجنیک و همکاران [۸] امکان‌سنجی جایگزینی عایق‌های حرارتی پرکاربرد با مواد

شکل ۴ مراحل ساخت نمونه‌های پشم عایق صوتی [۱۶].



شکل ۵ تغییر هدایت حرارتی، علامت گذاری: آبی–نمونه های ساخته شده با رزین، سبز–نمونه های ساخته شده با لاتکس [۱۶].

طبیعی و تجدیدپذیر که ارزش زیست‌محیطی بهتری دارند، بررسی شد. مشاهدات آن‌ها نشان داد که پشم گوسفند در مقایسه با پشم معدنی و سیلیکات‌کلسیم، ویژگی‌های عایق حرارتی قابل‌مقایسه‌ای را ارائه می‌دهد و در برخی کاربردها حتی از عملکرد بهتری برخوردار است. رویکردهای جدید در طراحی ساختمان‌های کارآمد و پایدار نه‌تنها بر اهداف کاهش مصرف انرژی تمرکز دارند، بلکه به دنبال کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز از طریق استفاده از مواد طبیعی و محلی در دسترس نیز هستند [۸،۱۳].

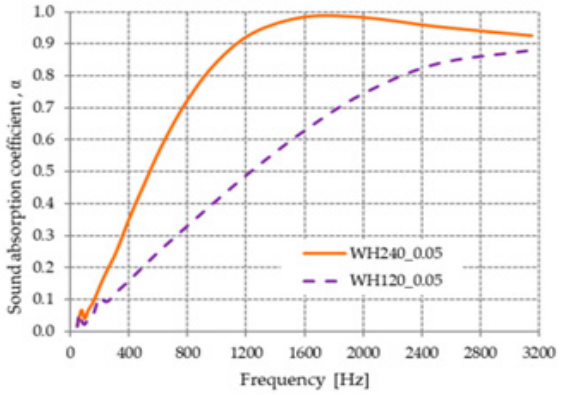
۶–۲ عایق صوتی

بازار محصولات عایق صوتی به‌دلیل اثربخشی آن‌ها به‌عنوان جاذب صدا و هزینه نسبتاً کم به‌طورکلی تحت سلطه صفحات اسفنجی و تخته‌های لیفی است. پشم معمولاً برای استفاده به‌عنوان ماده هسته (Core) گران در نظر گرفته می‌شود. با این حال، استفاده روزافزون از پشم به‌عنوان ماده عایق حرارتی باعث برخی مطالعات در مورد عملکرد صوتی آن نیز شده است. پشم ماده‌ای با مقاومت جریان کم و دارای چگالی kg/ m^3 ۱۰–۱۰۰ است. برای دستیابی به عملکرد عایق صوتی مفید، ضخامت پشم باید بسیار زیاد (بیش از ۵۰ mm) باشد. چنین موادی می‌توانند تلفات انتقال صدا را در دیوارها تا ۶ dB یا بیشتر جذب کنند [۱].

بورلا و همکاران [۱۷] با هدف استفاده از پشم گوسفند به‌عنوان ماده ساختمانی نوآورانه با بهبود خواص جذب صدا، کاهش هزینه‌های تولید و حفاظت از محیط‌زیست عایق‌هایی متشکل از الیاف پشم را ساختند و مورد مطالعه قرار دادند (شکل ۶). آن‌ها هفت ماده با پرس گرم الیاف پشم و یکی با پرس سرد ساختند. نتایج نشان داد که به سادگی با پرس گرم پشم، محصول متفاوتی به دست می‌آید که می‌توان آن را فراوری کرد. مواد به‌دست‌آمده دارای خواص جذب صدای بسیار خوبی با مقادیر ضریب جذب صوتی بالای ۰/۷ در بازه بسامدی ۳۱۵۰–۸۰۰ هرتز بودند. نتایج ثابت می‌کند که پشم گوسفند دارای عملکرد جذب صدا قابل مقایسه با پشم معدنی یا اسفنج پلی‌یورتان بازیافتی است [۱۷].

در تحقیقات دیگری مطابق شکل ۷ نشان داده که پشم یک ماده عایق صوتی عالی به‌شمار می‌رود و حداکثر جذب صدا را در ضخامت ۶۰ mm ارائه می‌دهد. صفحات پشم گوسفندی دارای ضریب جذب صوت حدود ۰/۸۴ در ۲۰۰۰ هرتز هستند که می‌توانند تا ۶ dB کاهش تلفات انتقال در دیوارهای گچی را بهبود بخشند. پشم همچنین می‌تواند به‌عنوان عایق ارتعاش استفاده شود که تا ۱۰ dB بهبود را فراهم می‌کند [۱۳،۱۵].

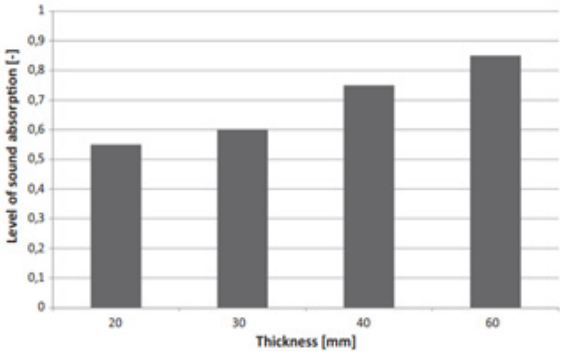
در پژوهشی توسط گونا و همکاران [۲]، کامپوزیت‌های پشم گوسفند–پلی‌پروپیلن ارزان‌قیمت (بدون هیچ‌گونه افزودنی بازدارنده شعله) حاوی ۹۰٪ الیاف پشم با الیاف PP به‌عنوان



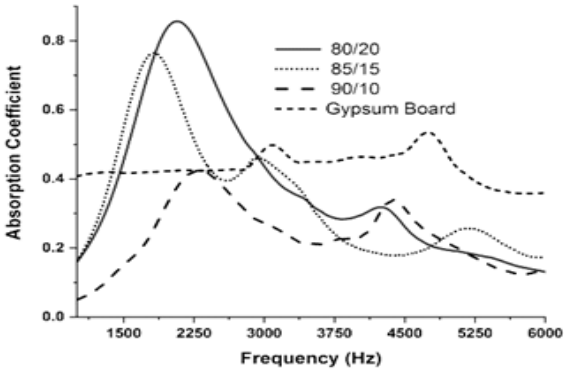
(ب)

(الف)

شکل ۶ (الف) نمونه‌های تهیه شده برای اندازه‌گیری ضریب جذب صدا و (ب) تغییر در ضریب جذب آکوستیک نسبت به ضخامت [۱۷].



شکل ۷ مقادیر ضریب جذب صدا برای نمونه‌های آزمایشی با ضخامت‌های مختلف [۱۵].

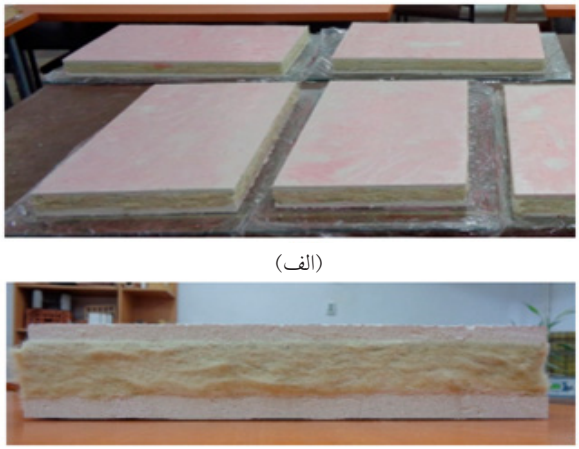


شکل ۸ عملکرد جذب صدا کامپوزیت‌های پشم-PP در فرکانس‌ها و مقادیر مختلف لیف [۲].

زمینه، به روش قالب‌گیری فشاری ساخته و با کاشی‌های سقف کاذب تجاری موجود مقایسه شد. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، کامپوزیت‌ها بهترین بازدارندگی شعله، ضریب جذب صدا تا ۰/۸۶ و هدایت حرارتی در بازه W/mK ۰/۰۸۳-۰/۰۵۳ را داشتند. کامپوزیت‌های پشم-PP پایداری حرارتی عالی تا دمای ۲۵۰ °C با کاهش وزن کمتر از ۱/۲٪ از خود نشان دادند. بالاترین میزان جذب آب کامپوزیت‌ها پس از ۲۴ ساعت ۳۴٪ (وزنی/وزنی) در مقابل ۸۴٪ برای دیوار گچی بود. کاربردهای بالقوه کامپوزیت پشم-PP در خودروسازی و داخل ساختمان است.

دل‌ری و همکاران [۱۸] پشم گوسفند را به‌عنوان ماده پایدار برای کاربردهای صوتی مورد مطالعه قرار دادند. این مواد از ترکیب پشم گوسفند با الیاف پلی‌استر به‌دست‌آمده از تکه‌های پلی‌اتیلن‌ترفتالات (PET) بازیافتی که به‌عنوان پیونددهنده عمل می‌کنند (الیاف PET در دمای ذوب °C ۱۵۰-۱۴۰) ساخته شده‌اند. ماده نهایی دارای ۸۰٪ الیاف پشم گوسفند و ۲۰٪ باقی‌مانده الیاف PET بود. نتایج نشان داد که پشم گوسفند در ترکیب با الیاف PET ماده مناسب جاذب صدا در بسامدهای متوسط و بالا است. مقادیر ضریب جذب صوتی بالای ۰/۵ برای بازه بسامدی ۳۱۵۰ - ۶۰۰ هرتز برای بهترین ماده به‌دست‌آمد. در مقایسه با مواد عایق صوتی کلاسیک موجود در بازار یا در منابع پژوهشی، موارد به‌دست‌آمده در این تحقیق از ویژگی‌های خوبی برخوردار هستند. آن‌ها همچنین به‌دلیل عدم استفاده از پیونددهنده‌ها، سازگار با محیط‌زیست هستند و عوامل کاری (فشار و دما) نیاز به مصرف انرژی کم دارند. این مواد با خاصیت جذب صوتی بسیار خوب را می‌توان با پرس گرم و بدون وجود رطوبت نسبت به حالت استاندارد نمد به‌دست آورد [۱۸].

اخیراً در پژوهشی توسط تاماش و همکاران [۱۹]، صفحات ساندویچی جدیدی طراحی و پیشنهاد شده که می‌تواند برای جذب صدا و عایق صوتی در هوا مناسب باشد و به‌عنوان روکش کاربردی یا دیوار جداکننده سبک‌وزن مستقل استفاده می‌شود (شکل ۹). تا جایی که نویسندگان ادعا کرده‌اند، این اولین صفحات ساندویچی مبتنی بر پشم گوسفند است که فقط از مواد طبیعی استفاده کرده است. ساختار فوق با استفاده از پوسته (Skin) ورق‌های کامپوزیتی مبتنی بر آهک هیدراته و هسته مبتنی بر پشم گوسفند تهیه شد. عواملی مختلفی از آن شامل ضریب جذب صدا، عایق صوتی در هوا، هدایت حرارتی، مقاومت حرارتی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مورد بررسی قرار گرفت. شاخص عایق صدای هوابرد ثبت شده صفحه dB ۳۸ بود. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که صفحه مورد مطالعه مقادیر قابل‌مقایسه‌ای با سایر راه‌حل‌های کنترل صدا مصنوعی ثبت کرده است [۱۹].



(الف)

(ب)

شکل ۹ صفحات ساندویچی آماده‌شده: (الف) نمای کلی از صفحات اندازه کامل و (ب) برش سطح مقطع [۱۹].

نتیجه‌گیری

پشم گوسفند به‌عنوان یک لیف با عملکرد بالا دارای ویژگی‌های مثبت بسیاری است. طبیعی و تجدیدپذیر بوده و از سوخت‌های فسیلی به‌دست نمی‌آید. در تولید محصولات پشمی انرژی کمتری نسبت به الیاف مصنوعی مصرف می‌شود. یکی از بارزترین خواص پشم گوسفند مقاومت بالای آن در برابر شعله است. الیاف پشم آستانه اشتعال‌پذیری بالاتری نسبت به بسیاری از الیاف طبیعی و سنتزی دارد و تا دمای ۶۰۰ ^{o}C مقاوم در برابر شعله است و ذوب نمی‌شود و دودهای سمی کمتری در اثر سوختن ایجاد می‌کند. بر اساس این ویژگی‌های منحصربه‌فرد، پژوهشگران حساب ویژه‌ای روی الیاف پشم گوسفند به‌عنوان فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری باز کرده‌اند. نتایج تحقیقات نشان داده است که الیاف پشم نقش اساسی در بهبود خواص عایق حرارتی، عایق صوتی این کامپوزیت‌ها دارد. می‌توان ابراز امیدواری کرد که الیاف پشم گوسفند به‌دلیل کاهش هزینه‌های تولید و حفاظت از محیط‌زیست، رفته رفته جایگاه خود را به‌عنوان جایگزینی مناسب برای الیاف سنتزی پیدا کنند.

مراجع

1. Hearle J. W., High-Performance Fibres, Woodhead Publishing Ltd, First Edition, USA, **2001**.
2. Guna V., Ilangovan M., Vighnesh H.R., Sreehari, B.R., Abhijith S., Sachin H.E., Mohan C.B., Reddy N., Engineering Sustainable Waste Wool Biocomposites with High Flame Resistance and Noise Insulation for Green Building and Automotive Applications, *Journal of Natural Fibers*, 18, 1871-1881, **2021**.
3. Millington K., Rippon J.A., Wool as a High-Performance Fiber, in Structure and Properties of High-Performance Fibers, Woodhead Publishing Ltd, First Edition, Oxford, **2017**.
4. Davis M.L., Rippon J.A., the Coloration of Wool and Other Keratin Fibers, First Edition, John Wiley & Sons, UK, **2013**.
5. Pekhtasheva E., Neverov A., Kubica S., Zaikov G. E., Biodegradation and Biodeterioration of Some Natural Polymers, *Chemistry and Chemical Technology*, 6, 263-280, **2012**.
6. Allafi F., Hossain Md. S., Lalung J., Shaah M., Salehabadi A., Ahmad M. I., Shadi A., Advancements in Applications of Natural Wool Fiber, *Journal of Natural Fibers*, 19, 497-512, **2022**.
7. Szatkowski P., Tadla A., Flis Z., Szatkowska M., Suchorowiec K., Molik E., The Potential Application of Sheep Wool as a Component of Composites, *Roczniki Naukowe Polskiego Towarzystwa Zootechnicznego*, 17, 1-8, **2021**.
8. Korjenic A., Klarić S., Hadžić A., Korjenic S., Sheep Wool as a Construction Material for Energy Efficiency Improvement, *Energies*, 8, 5765-5781, **2015**.
9. Leeder J., Rippon J., Changes Induced in the Properties of Wool By Specific Epicuticle Modification, *Journal of the Society of Dyers And Colourists*, 101, 11-16, **1985**.
10. Shaw T., White M.A., Benisek L., Rushforth M.A., Christoe J.R., Russell I.M., The Chemical Technology of Wool Finishing, in Handbook of Fiber Science and Technology: Chemical Processing of Fibers and Fabrics, First Edition, Routledge, **2018**.
11. Benisek L., Communication: Improvement of the Natural Flame-Resistance of Wool. Part I: Metal-Complex Applications, *Journal of the Textile Institute*, 65, 102-108, **1974**.
12. Beheshti M.H., Khavanin A., Safari V. A., Yahya M.N. Bin., Alami A., Khajenasiri F., Talebitooti R., Improving the Sound Absorption of Natural Waste Material-based Sound Absorbers Using Micro-perforated Plates, *Journal of Natural Fibers*, 19, 1-12, **2021**.
13. Corscadden K.W., Biggs J.N., Stiles D.K., Sheep's Wool Insulation: A Sustainable Alternative Use for a Renewable Resource?, *Resources*, *Conservation And Recycling*, 86, 9-15, **2014**.
14. Helepciuc C.M., Sheep Wool–A Natural Material Used in Civil Engineering, Buletinul Institutului Politehnic Din Lasi. Sectia Constructii, *Arhitectura*, 63, 21-30, **2017**.
15. Zach J., Zach Korjenic A., Petránek V., Hroudová J., Bednar T., Performance Evaluation and Research of Alternative Thermal Insulations Based on Sheep Wool, *Energy and Buildings*, 49, 246-253, **2012**.
16. Dénes T.O., Dénes Iştoan, R., Tămaş G., Daniela R., Manea D.L., Hegyi A., Popa F, Vasile O., Analysis of Sheep Wool-based Composites for Building Insulation, *Polymers*, 14, 2109, **2022**.
17.Borlea S.I., Tiuc A.E., Nemeş O., Vermeşan H., Vasile O., Innovative Use of Sheep Wool for Obtaining Materials with Improved Sound-Absorbing Properties, *Materials*, 13, 694-707, 1-25, **2020**.
18. Del R.R., Uris A., Alba J., Candelas P., Characterization of Sheep Wool as a Sustainable Material for Acoustic Applications, *Materials*, 10, 1277, **2017**.
19. Tămaş G., Daniela R., Dénes T.O., Iştoan R., Tiuc A. E., Manea D. L., Vasile O., A Novel Acoustic Sandwich Panel Based on Sheep Wool, *Coatings*, 10, 148-162, **2020**.