Review Article

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 16, Number 1
Pages 23-30
ISSN: 2252-0449

Application of Agricultural Wastes for Green Packaging

Reza Pourbaba and Kambiz Pourtahmasi*

Department of Wood and Paper Science and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Postal Code 31587-77871, Karaj, Iran

Received: 10 October 2025, Accepted: 25 January 2026

Abstract

The widespread use of petroleum-based plastics in packaging and disposable products has created serious environmental and economic challenges worldwide. Although biodegradable alternatives to these polymers have been introduced, the lack of scalability and cost-effectiveness of these alternatives remain major obstacles to their widespread use. Molded fiber products (MFPs) have been proposed as promising alternatives to petroleum-based plastics. However, their production requires sustainable and low-cost sources of lignocellulosic fibers. Iran has always faced limitations in the supply of wood fibers due to major challenges resulting from the scarcity of forest and water resources. Agricultural residues, which are abundantly available and often considered as waste, high levels of holocellulose that can be converted into high-yield pulps. Using these wastes in the agricultural production value chain, not only reduces the cost of raw materials, but also creates added value for agricultural by-products. Establishing small and medium-sized units to convert these wastes into mechanical or semi-chemical pulps can strengthen the regional supply chain and reduce dependence on wood resources and production costs. This approach has two simultaneous advantages: on the one hand, reducing plastic pollution, and on the other hand, providing an economical and sustainable path to expand the use of environmentally friendly packaging.

Key Words

agricultural waste, lignocellulosic fibers, molded fiber product, sustainable packaging, plastics

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pourtahmasi@ut.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال شانزدهم، شماره ۱،
صفحه ۳۰-۲۳، ۱۴۰۵
ISSN: 2252-0449

کاربرد پسماندهای کشاورزی برای بسته‌بندی سبز

رضا پوربابا و کامبیز پورطهماسی*
کرج، دانشگاه تهران، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ،
کدپستی ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱

دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۶

چکیده

استفاده گسترده از پلاستیک‌های پایه‌نفتی در بسته‌بندی و محصولات یک‌بارمصرف، چالش‌های جدی محیط‌زیستی و اقتصادی در سطح جهان ایجاد کرده است. هرچند جایگزین‌های زیست‌تخریب‌پذیر این پلیمرها معرفی شده‌اند، اما مقیاس‌ناپذیری و عدم مقرون‌به‌صرفگی این جایگزین‌ها، همچنان موانع اصلی در کاربرد گسترده آن‌ها به‌شمار می‌رود. فراورده‌های الیاف قالب‌گیری‌شده (MFPs) به‌عنوان جایگزین‌های نویدبخش پلاستیک‌های پایه‌نفتی مطرح شده‌اند. بااین‌حال، تولید آن‌ها نیازمند منابع پایدار و کم‌هزینه از الیاف لیگنوسلولوزی است. کشور ایران به‌واسطه چالش‌های عمده حاصل از کمبود منابع جنگلی و آب، همواره با محدودیت تهیه الیاف چوبی مواجه بوده است. پسماندهای کشاورزی که به فراوانی دردسترس‌اند و اغلب به‌عنوان ضایعات محسوب می‌شوند، مقادیر زیادی هولوسلولوز داشته که قابلیت تبدیل به خمیرکاغذهای پربازده را دارند. استفاده از این پسماندها در زنجیره ارزش تولید کشاورزی، نه‌تنها هزینه مواد اولیه را کاهش می‌دهد، بلکه ارزش افزوده‌ای برای محصولات جانبی کشاورزی ایجاد می‌کند. ایجاد واحدهای کوچک و متوسط برای تبدیل این پسماندها به خمیرهای مکانیکی یا نیمه‌شیمیایی می‌تواند زنجیره تأمین منطقه‌ای را تقویت کند و وابستگی به منابع چوبی و هزینه تولید را کاهش دهد. این رویکرد دو مزیت هم‌زمان دارد: ازیک‌سو کاهش آلودگی ناشی از پلاستیک‌ها و ازسوی‌دیگر فراهم آوردن مسیر اقتصادی و پایدار برای گسترش استفاده از بسته‌بندی‌های دوستدار محیط‌زیست.


رضا پوربابا


کامبیز پورطهماسی

واژگان کلیدی

پسماند کشاورزی،
الیاف لیگنوسلولوزی،
فراورده الیاف قالب‌گیری‌شده،
بسته‌بندی پایدار،
پلاستیک‌ها

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
pourtahmasi@ut.ac.ir

مقدمه

حفاظت از محیط‌زیست از چالش‌های اصلی عصر حاضر است. به‌دلیل افزایش آگاهی و نگرانی‌های زیست‌محیطی درباره افزایش جمعیت و فراورده‌های صنایع مختلف برای رفع نیازهای بشری، رویکردهای نوین تولید با هدف استفاده از منابع تجدیدپذیر و توسعه پایدار مورد توجه است. در این رویکردها، به روش‌های جدید تولید با بهره‌گیری از مواد ارزان و دسترس‌پذیر با هدف استفاده از منابع طبیعی بدون آسیب به محیط‌زیست برای تولید بیشتر و آلودگی کمتر توجه شده است که در فراوری آن‌ها محصولات جانبی نامطلوب تولید نشود [۱].

پلاستیک‌ها ازجمله مهم‌ترین و بیشترین مواد مصرفی هستند که حجم آلایندگی زیادی برای محیط‌زیست دارند. پلاستیک‌های پایه‌نفتی، ترکیبات آلی سنتزی با وزن مولکولی زیاد و مولکول‌های زنجیربلند هستند. ۷-۵ درصد مصرف جهانی نفت به تولید پلاستیک اختصاص دارد. بیش از ۸۵۰ Mt کربن دی‌اکسید به جو وارد می‌شود که ناشی از فرایند تولید پلاستیک‌هاست [۲]. این آمارها نشانگر اهمیت تغییر نگرش درباره استفاده از پلاستیک است. این مواد از عناصری مانند کربن، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، کلر و برم ساخته می‌شوند. عمده پلاستیک‌ها ارزان بوده و وزن سبک و شکل‌پذیری زیادی دارند. باوجوداین تخریب‌پذیر نیستند و در طبیعت پایدارند. کاربرد این مواد در صنایع مختلف به‌دلیل شکل‌پذیری بسیار زیاد در اندازه و وزن‌های مختلف بسیار رایج است. عمده‌ترین پلاستیک‌ها شامل پلی‌اتیلن، پلی‌استیرن، پلی‌وینیل کلرید، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات است که در تمام بخش‌های زندگی روزمره کاربرد دارند [۳].

براساس آمارها، مجموع تولید پلاستیک در جهان از سال ۱۹۵۰ تا سال ۲۰۱۹، ۸۱ Mt بوده است. بخش بسته‌بندی به‌عنوان پرمصرف‌ترین بخش شناخته می‌شود، به‌طوری که در سال ۲۰۱۵، ۱۴۶ Mt به این بخش اختصاص داشته است. از این میزان ۱۴۱ Mt (۹۶/۶ درصد) به‌صورت غیربازیافتی به‌عنوان پسماند دفع شده است [۴]. همچنین، پلاستیک‌های مصرفی در بخش بسته‌بندی دارای کوتاه‌ترین چرخه حیات است، به‌طوری‌که بخشی از آن‌ها تنها به‌مدت چند دقیقه استفاده می‌شوند. ازسوی‌دیگر، آلودگی ناشی از پلاستیک‌ها بسیار پرهزینه است. از سال ۲۰۰۴ میلادی، با انتشار گزارش‌های مختلف مبنی بر وجود میکروپلاستیک‌ها (با ابعاد ۱ µm تا ۵ mm) و نانوپلاستیک‌ها (با ابعاد ۱۰۰ nm تا کمتر از ۱ µm) در دریاها و آب اقیانوس‌ها و آثار نامطلوب آن‌ها بر موجودات زنده، تلاش‌های زیادی برای کاهش مصرف پلاستیک‌ها و استفاده از مواد جایگزین انجام شده است. مطابق آمار، تنها در مناطق آفریقا و آسیا، خسارت اقتصادی ناشی از آلودگی پلاستیک در صنعت گردشگری و ماهیگیری معادل ۱/۳میلیارد دلار برآورد شده است. همچنین، آلودگی پلاستیک در دریاها سالانه به‌میزان ۴۰ میلیارد دلار خسارت به‌بار آورده است. افزون‌بر مخاطرات زیست‌محیطی، خطر ورود ریزپلاستیک‌ها (میکرو و نانو) به چرخه غذایی از طریق بلع، استنشاق و تماس پوستی سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند [۵،۶].

برخی پژوهشگران، وجود ذرات پلاستیکی را در نمونه‌های خون افراد سالم گزارش کرده‌اند. عمده‌ترین پلاستیک‌های شناسایی‌شده در خون شامل پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌اتیلن، پلی‌استیرن و پلی‌متیل آکریلات بوده است [۹-۷]. همه این مطالعات، احتمال تجمع این پلاستیک‌ها در اعضای بدن را تأیید کرده‌اند. ازسوی‌دیگر، مطالعاتی درباره نحوه واکنش پلاستیک‌های نفوذی به بافت‌های زنده ازطریق چسبندگی به غشای یاخته با استفاده از تصاویر میکروسکوپ فلوئورسان انجام شده است. این مطالعات نشان می‌دهد، چسبندگی ذرات پلاستیکی (میکرو و نانو) به غشای یاخته با ایجاد پیوندهای هالوژن‌دار (مانند کلر-کربن) به نفوذپذیری بیشتر غشای یاخته منجر می‌شود و نفوذ این ذرات به‌درون یاخته‌ها را افزایش می‌دهد. ورود و تجمع این ذرات درون یاخته‌ها بر عملکرد طبیعی آن‌ها اثر می‌گذارد و به تداخل فعالیت یاخته‌ها منجر می‌شود [۱۳-۱۰].

بخش بسیار کوچکی از تولید پلاستیک‌ها به انواع تخریب‌پذیر و زیست‌پایه اختصاص دارد. به‌طوری‌که تنها ۲ Mt از ۴۰۰ Mt پلاستیک‌های تولیدی در سال ۲۰۲۴ (کمتر از ۱ درصد) به پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر اختصاص داشت. این نوع پلاستیک‌ها از مواد زیستی طبیعی تهیه شده و برخلاف پلاستیک‌های پایه‌نفتی از عوامل شیمیایی و حلال‌های سمی کمتری برای تهیه آن‌ها استفاده می‌شود. این نوع پلاستیک‌ها، به‌دلیل ویژگی زیست‌تخریب‌پذیری در مقایسه با پلاستیک‌های پایه‌نفتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۴،۱۵].

با شیوع بیماری کرونا در سال ۲۰۱۹، مصرف پلاستیک‌ها بیشتر شد. به‌طوری‌که تقاضای ضروری برای تجهیزات محافظت شخصی یک‌بارمصرف مانند ماسک، دستکش و شیلدهای صورت به‌طور سرسام‌آوری افزایش یافت. چند ممنوعیت درباره پلاستیک‌های یک‌بارمصرف به‌طور موقت لغو شد، کیسه‌های خرید قابل‌استفاده مجدد ممنوع شدند و در برخی مکان‌ها، ظروف پلاستیکی بازیافت‌پذیر به‌طور سنتی به‌دلیل آلودگی بیماری‌زا، خطرناک درنظر گرفته شدند. در برخی کشورها، میزان پسماندهای پلاستیکی پزشکی ۱۰-۳ برابر افزایش یافت و خطر دفع میلیون‌ها تن پسماند پلاستیکی

بیشتر به محیط‌زیست ازجمله اقیانوس‌ها بیشتر شد [۱۶]. بحران کرونا، خطرات وابستگی به مواد پلاستیک پایه‌نفتی را بیش‌ازپیش آشکار کرد. همچنین، توجه پژوهشگران به لزوم جایگزینی این پلاستیک‌ها با مواد زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر جلب شد. بااین‌حال، مسائل اقتصادی غالباً مقدم بر مسائل زیست‌محیطی هستند و رقابت‌پذیری مواد جایگزین به‌شدت به هزینه و قیمت بستگی دارد.

زیست‌پالایش، مشابه مفهوم رایج پالایش نفت، به‌معنای تبدیل مواد اولیه تجدیدپذیر زیستی به مواد شیمیایی قابل‌استفاده است. زیست‌توده منبع تولید مواد نسبتاً سریع تجدیدپذیر است که به‌طور عمده به دو دسته ماده اولیه نسل اول و نسل دوم تقسیم‌بندی می‌شود. ماده اولیه نسل اول، عمدتاً مربوط به قندهای تخمیرپذیر است که از منابع پلی‌ساکاریدی مانند ذرت و باگاس و روغن‌های گیاهی تهیه می‌شوند. مطالعات زیادی درباره امکان استفاده از این نوع ماده اولیه برای تولید محصولات زیست‌پایه انجام شده است. بااین‌حال، به‌دلیل هم‌پوشانی استفاده از این مواد برای تهیه پلاستیک و موادغذایی با تهدید امنیت غذایی نمی‌توان به‌طور صنعتی از این منابع استفاده کرد. به‌عنوان مثال، برای تولید Mt ۱۷۰ پلاستیک بسته‌بندی در سال با استفاده از این مواد، ۵۴ درصد از ذرت تولیدی و ۶۰ درصد آب مصرفی اروپا لازم است. به‌طور مسلم نمی‌توان برای دسترسی به این هدف، امنیت غذایی را به خطر انداخت [۱۷].

زیست‌توده نسل دوم که از نظر دسترسی و گستردگی منابع درخور توجهی هستند، ازنظر ساختاری تا حدودی پیچیده‌ترند. پژوهش‌هایی که با نگرش زیست‌پالایش مواد لیگنوسلولوزی (مانند ساقه گندم و باگاس نیشکر) انجام می‌شود با هدف ایجاد فرایندهای تبدیل این مواد به مواد باارزش‌تر است. این پسماندهای کشاورزی عموماً ارزان‌قیمت هستند، اما جداسازی قندهای تخمیرپذیر سلولز و همی‌سلولز از شبکه پلیمری لیگنین نیازمند فرایندهای اضافی است، زیرا لیگنین لایه محافظ روی این پلی‌ساکاریدها ایجاد می‌کند. منبع دیگر پلی‌ساکارید، جلبک دریایی بوده که شامل جلبک‌های قرمز و قهوه‌ای است. آلژینات‌ها پلی‌ساکاریدهای جلبک قهوه‌ای هستند که حدود ۴۰ درصد وزن این نوع جلبک را شامل می‌شوند. آلژینات‌ها می‌توانند با کاتیون‌های سه‌گانه یا دوگانه واکنش داده و تشکیل ژل دهند. همچنین از آنها می‌توان با نشاسته برای ایجاد فیلم‌های پلاستیکی تخریب‌پذیر استفاده کرد که نفوذپذیری گاز کم و ویژگی‌های مکانیکی مناسب دارند [۱۸،۱۹].

امروزه تقریباً هر مونومر مورد نیاز برای تولید پلیمرهای پایه‌نفتی را می‌توان از زیست‌توده به‌دست آورد. افزون‌براین، برخی از



شکل ۱- ظروف ساخته‌شده با استفاده از فرایند MFPها [۲۲].

پلیمرهای جدید را که به‌راحتی از منابع پایه‌نفتی قابل‌تولید نیست نیز می‌توان از زیست‌توده تهیه کرد. روش‌های تهیه مونومرهای وینیلی، کربوکسیلیک اسیدها، الکل‌ها، آمیدها و لاستیک‌ها از زیست‌توده به‌طور گسترده مطالعه شده است [۱۸،۲۰،۲۱].

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه ساخت پلیمرهای زیست‌پایه برای تولید مواد بسته‌بندی، قیمت تمام‌شده این محصولات بیش از پلیمرهای پایه‌نفتی هستند. بنابراین ازنظر اقتصادی، هنوز پلیمرهای پایه‌نفتی برای بسته‌بندی در مرکز توجه هستند. اما فناوری ساخت برخی از مواد بسته‌بندی از الیاف لیگنوسلولوزی ازنظر اقتصادی در حال ارتقاست. فراورده‌های الیاف قالب‌گیری‌شده (molded fiber products, MFPs) به‌عنوان یکی از مواد بسته‌بندی سبز و پایدار، به‌دلیل تجدیدپذیری، بازیافت‌پذیری، پایداری و زیست‌تخریب‌پذیری مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این محصولات که در شکل ۱ معرفی شده‌اند، از الیاف لیگنوسلولوزی تخریب‌پذیر ساخته می‌شوند [۲۲].

برای تهیه خمیرکاغذ از منابع لیگنوسلولوزی، فرایندهای مختلف ازجمله کرافت، سولفیت، سودا و فرایندهای مکانیکی مانند خمیرسازی شیمیایی مکانیکی (CMP)، خمیرسازی شیمیایی گرمامکانیکی (CTMP)، سولفیت خنثای نیمه‌شیمیایی (NSSC) و خمیرسازی گرمامکانیکی (TMP) تجاری‌سازی شده‌اند. فرایندهای استفاده از حلال‌های یونی (IL) و اتکتیک ازجمله فرایندهای سبز درحال تجاری‌سازی هستند. بااین‌حال، فرایندهای کرافت و سولفیت نیاز به سرمایه‌گذاری زیادی دارند تا تولید خمیرکاغذ صرفه اقتصادی داشته باشد. فرایند ارگانوسولو، فرایندی سازگار با محیط‌زیست است که درحال‌حاضر مورد توجه کشورهای توسعه‌یافته قرار گرفته است. همچنین، توسعه فرایندهای

به‌کارگیری حلال‌های یونی و اتکتیک برای بازیابی مواد شیمیایی می‌تواند مسیر استفاده از این فرایندها را به‌طور تجاری، هموار کند.

در فرایند ساخت MFPها، ابتدا الیاف به‌صورت خمیر تهیه می‌شوند. سپس، شکل‌دهی می‌شوند و درنهایت پرس شده و خشک می‌شوند تا به شکل‌های مختلف محصولات سه‌بعدی تهیه شوند. درحال‌حاضر، MFPها در بازارهای بسته‌بندی صنعتی به‌شکل تجاری استفاده می‌شوند که ازجمله بسته‌بندی مواد غذایی (مانند تخم‌مرغ و میوه‌ها)، صنعتی (لوازم الکترونیکی و قطعات ماشین) را می‌توان نام برد. برندهای تجاری مختلف در جهان در حال ساخت این محصولات هستند که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به Pulpac سوئد، EAMC چین، MFT-CKF آمریکا، Parason هند و RyPax آمریکا اشاره کرد. الیاف لیگنوسلولوزی، تخریب‌پذیر بوده و هیچ خطر زیست‌محیطی ندارند. این الیاف بازیافت‌پذیرند و امکان استفاده چندباره آن‌ها وجود دارد. بنابراین بهترین گزینه برای استفاده در بسته‌بندی محصولات، به‌ویژه ظروف بسته‌بندی یک‌بارمصرف است.

منابع الیاف لیگنوسلولوزی

الیاف لیگنوسلولوزی به‌صورت عمده، به ۲ دسته الیاف چوبی و غیرچوبی تقسیم‌بندی می‌شود. الیاف چوبی شامل ۲ دسته الیاف سوزنی‌برگ (مانند الیاف کاج، نراد و نوئل) و الیاف پهن‌برگ (مانند صنوبر، اکالیپتوس، راش) است. الیاف غیرچوبی هم شامل گیاهان یک‌ساله (مانند باگاس، برنج، گندم، بامبو، شاهدانه، نی و پنبه) است. ویژگی‌های شکل‌شناختی الیاف چوبی (الیاف سوزنی‌برگان و پهن‌برگان) و غیرچوبی شامل طول الیاف و ضخامت دیواره الیاف است که با توجه به گونه، عرض جغرافیایی، سن و محیط رشد متفاوت است. بااین‌حال به‌طورکلی، طول الیاف و ضخامت دیواره الیاف سوزن‌برگان بلندتر از الیاف پهن‌برگان و غیرچوبی است.

در گونه‌های غیرچوبی، الیاف به‌دست‌آمده از گونه‌هایی چون پنبه، شاهدانه، کتان و کنف بلند هستند که با الیاف سوزنی‌برگان مقایسه‌پذیرند. ازنظر ترکیب شیمیایی نیز الیاف لیگنوسلولوزی عمدتاً از سلولوز، لیگنین و همی‌سلولوزها و درصد کمی مواد استخراجی و خاکستر تشکیل شده‌اند. این الیاف را می‌توان با فرایندهای شیمیایی و مکانیکی از چوب و منابع غیرچوبی تهیه کرد. کاغذهای بازیافتی نیز می‌توانند منبع تهیه الیاف لیگنوسلولوزی باشند. استفاده از چوب برای تهیه الیاف لیگنوسلولوزی رایج‌ترین منبع تولید الیاف لیگنوسلولوزی است، اما به‌علت در خطر قرارگیری منابع جنگلی، آلودگی محیط‌زیست و گرم شدن کره زمین، برداشت چوب از جنگل‌ها باید محدودتر شود. کاغذ بازیافتی نیز درعمل پس از چندبار بازیافت خواص مدنظر را ازدست می‌دهد و کیفیت محصول تولیدی مطلوب نخواهد بود. الیاف گیاهان غیرچوبی که شامل سه دسته پسماندهای کشاورزی، گیاهان صنعتی و رویشی طبیعی هستند، منبع دیگر تولید الیاف لیگنوسلولوزی را تشکیل می‌دهند. درحال‌حاضر، حدود ۸ درصد از تولید خمیرکاغذ در جهان با استفاده از پسماندهای کشاورزی بوده و ۹۲ درصد آن از الیاف چوبی (الیاف بکر و بازیافتی) است. کشورهای چین و هند به‌عنوان کشورهای پیشرو در استفاده از الیاف لیگنوسلولوزی غیرچوبی برای تأمین خمیرکاغذ هستند [۲۳]. فرایند سودا که در آن با استفاده از سدیم هیدروکسید (۱۰ درصد تا ۱۸ درصد) در دمای ۱۴۰ °C تا ۱۸۰ °C در مخزن پخت، مواد لیگنوسلولوزی به خمیرکاغذ تبدیل می‌شوند، به‌عنوان ساده‌ترین فرایند خمیرکاغذسازی شناخته می‌شود. در دهه‌های گذشته، احداث واحدهای کوچک‌مقیاس برای تولید خمیرکاغذ از پسماندهای کشاورزی با استفاده از فرایند سودا در کشورهای چین و هند به‌شدت توسعه یافته است. بااین‌حال، به‌دلیل پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از عدم مدیریت پساب‌های صنعتی این واحدها، تعداد آن‌ها به‌شدت کاهش یافت. جدول ۱ مقدار پسماند کشاورزی تولیدشده سالانه در جهان را به‌طور تخمینی نشان می‌دهد.

به‌طور عمده گیاهان غیرچوبی را می‌توان براساس ویژگی‌های الیاف به دو دسته عمده تقسیم‌بندی کرد:

– دسته اول، الیاف گیاهان غیرچوبی جایگزین الیاف پهن‌برگان است که شامل ساقه گندم، باگاس، بامبو، نی‌ها، علف‌ها، کنف و سورگوم است.

– دسته دوم، مربوط به الیاف گیاهان غیرچوبی است که قابلیت جایگزینی الیاف سوزنی‌برگان را دارد و شامل لینتر پنبه، شاهدانه، کنف و بامبو است.

جدول ۱– رایج‌ترین پسماندهای کشاورزی در جهان [۲۳].

ماده اولیه	زیست‌توده خشک دردسترس (Mt)
لینتر پنبه	۲/۷
ساقه پنبه	۶۷
باگاس نیشکر	۱۰۲
ساقه سورگوم	۲۵۲
ساقه ذرت	۷۵۰
جو	۱۹۵
برنج	۳۶۰
گندم	۶۰۰

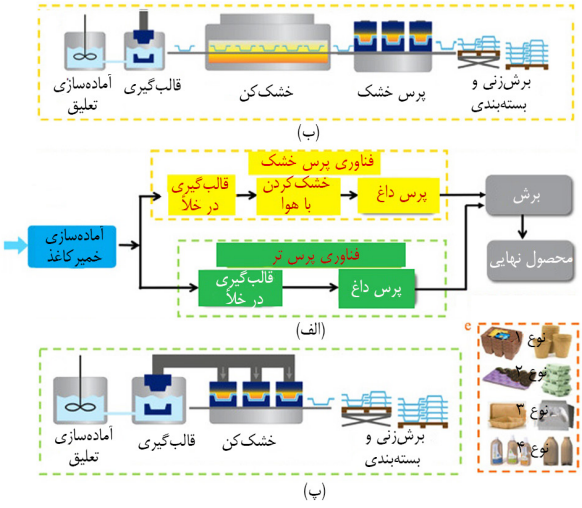
ویژگی فیزیکی و شیمیایی الیاف گیاهان غیرچوبی، بسیار متنوع است. الیاف پسماندهای کشاورزی مانند ساقه‌های گندم و برنج، باگاس و ساقه ذرت بیشتر شبیه الیاف پهن‌برگان هستند.

پسماندهای کشاورزی به‌عنوان ایده‌آل‌ترین منابع لیگنوسلولوزی شناخته می‌شوند. دلیل آن، دسترسی همیشگی، قیمت ارزان و حجم تولید زیاد این پسماندهاست. برخی از پسماندهای کشاورزی به‌صورت صنعتی استفاده شده و برای تولید محصولات مختلف مانند کاغذ، صفحات فشرده چوبی و خوراک دام مصرف می‌شوند. ازجمله مشکلات استفاده از پسماندهای کشاورزی، حجیم بودن این پسماندها، محدودیت در فصل برداشت و درصد بیشتر مواد معدنی آن‌ها مانند سیلیس در مقایسه با منابع چوبی است. سیلیس زیاد به مشکلاتی نظیر مصرف بیشتر قلیا در فرایند پخت منجر می‌شود و وجود آن در فرایند بازیابی مواد شیمیایی پخت، مشکلاتی چون رسوب در تجهیزات بازیابی را ایجاد می‌کند. همچنین، بخشی از این پسماندهای کشاورزی به‌عنوان خوراک دام استفاده می‌شود که باعث ایجاد رقابت میان صنعت خوراک دام و بخش استفاده از این پسماندها می‌شود [۲۴]. بااین‌حال، توسعه فناوری زیست‌پالایش که به‌منظور تولید مواد با ارزش افزوده بیشتر از مواد لیگنوسلولوزی در حال ارتقاست، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای استفاده از پسماندهای کشاورزی در واحدهای کوچک‌مقیاس با سرمایه‌گذاری کمتر باشد. در این فناوری، قابلیت جداسازی ترکیبات تشکیل‌دهنده مواد لیگنوسلولوزی (سلولوز، لیگنین و همی‌سلولوزها) به‌طور مؤثرتر انجام شده و هرکدام از ترکیبات برای تولید محصولات مختلف استفاده می‌شود.

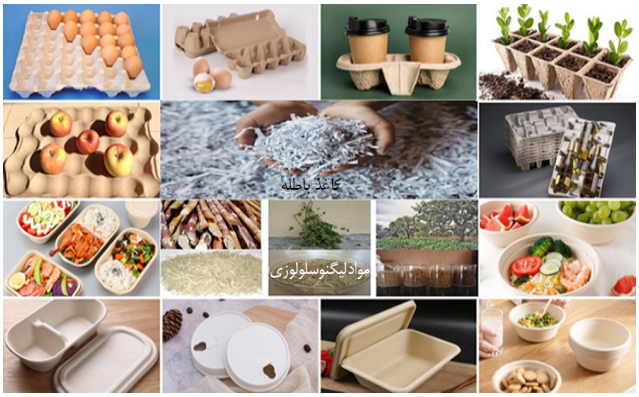
قابلیت بالقوه تولید محصولات MFPها از پسماندهای کشاورزی در ایران

بخش کشاورزی در ایران با تولید سالانه ۱۰۰ Mt محصولات کشاورزی، نقش مهمی را در تأمین ۹۰ درصد نیاز غذایی و درنتیجه اقتصاد کشور دارد. این در حالی است که ضایعات کشاورزی در ایران ۳۰ درصد تا ۳۵ درصد با ارزش سالانه معادل ۱۵ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود که حدود ۶ برابر متوسط جهان است [۲۵]. دفن، سوزاندن و رها کردن ضایعات و پسماندهای کشاورزی ازجمله معضلات زیست‌محیطی کشور محسوب می‌شود. بازاستفاده از ضایعات کشاورزی یا بازیافت آن یکی از روش‌های مدیریت ضایعات و پسماندهای کشاورزی است. سالانه میلیاردها دلار در کشور صرف تولید محصولات کشاورزی شده و در حدود ۳۰ درصد تا ۳۵ درصد از این محصولات دور ریخته می‌شود. همچنین، میلیاردها تومان صرف جمع‌آوری و ازبین بردن این ضایعات می‌شود که در هر صورت خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به محیط‌زیست وارد می‌کند. درصورتی‌که بیشتر این ضایعات قابل‌استفاده هستند و با سرمایه‌گذاری مناسب برای استفاده از آن‌ها، نه‌تنها می‌توان از خسارت‌های بیشتر به محیط‌زیست و آلوده‌سازی آن جلوگیری کرد، بلکه میزان نیاز انسان به مواد اولیه و برداشت از ذخایر طبیعی و معدنی را کاهش می‌دهد و بقایای آن را برای نسل‌های بعدی تضمین می‌کند. بنابراین توجه به پسماندهای کشاورزی اهمیت فراوانی در راستای رسیدن به توسعه پایدار دارد. با مدیریت صحیح پسماندهای بخش کشاورزی و کاهش ضایعات این بخش می‌توان در راستای دست‌یابی به اهداف توسعه پایدار، تولید انرژی‌های زیستی و حفظ محیط‌زیست گام برداشت. هرچند ویژگی‌های شکل‌شناختی (طول الیاف کمتر، دیواره یاخته نازک‌تر و درصد زیاد خاکستر) الیاف سلولوزی پسماندهای کشاورزی در مقایسه با الیاف سلولوزی سوزنی‌برگان و پهن‌برگان ضعیف‌تر است، اما این ویژگی‌ها، کاربرد آن‌ها را در بخش تولید ظروف بسته‌بندی به‌دلیل ارزان‌تر بودن، توجیه می‌کند.

همان‌طور که گفته شد، MFPها یکی از جدیدترین فناوری‌ها برای جایگزینی مواد پایه‌زیستی بسته‌بندی با پلاستیک‌های پایه‌نفتی محسوب می‌شود. این محصولات ازنظر قیمت و عملکرد در گستره وسیعی ازجمله بسته‌بندی و محصولات یک‌بارمصرف قابلیت کاربرد دارد. در فرایند تولید این محصولات، ابتدا الیاف لیگنوسلولوزی به‌شکل دوغاب (خمیرکاغذ) تهیه می‌شوند. سپس در قالب مدنظر آبگیری می‌شوند و درنهایت تحت پرس داغ با فشار و دمای مشخص قرار می‌گیرند. نمایی از فرایند تولید این



شکل ۲- نمایی از فرایند تولید MFPها [۲۲].



شکل ۳- ظروف یک‌بارمصرف تهیه‌شده با استفاده از MFPها [۲۲].

نوع محصولات در شکل ۲ ارائه شده است. در روش خشک، ورق کاغذ در دستگاه قالب‌گیری قرار گرفته و با استفاده از دما و فشار خاص عملیات قالب‌گیری انجام می‌گیرد. مزیت اصلی روش خشک نسبت به روش تر، عدم نیاز به آب برای قالب‌گیری است، بنابراین مصرف آب بسیار کاهش می‌یابد.

محصولات تولیدی از MFPها بسیار متنوع بوده و امکان تهیه بسته‌بندی‌های یک‌بارمصرف به‌ویژه در بخش غذایی از این روش وجود دارد. به‌طور مثال، سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ظرف بسته‌بندی غذایی یک‌بارمصرف از مواد پلاستیکی و آلومینیمی (شکل ۳) در جهان تولید می‌شود [۲۶] که بخش اعظم آن را می‌توان با استفاده از MFPها تهیه کرد و از خطرهای ناشی از ظروف پلاستیکی و آلومینیمی (خطر انتقال میکرو و نانوپلاستیک‌ها به بدن انسان و ترکیبات آلومینیمی) و نیز آلودگی ناشی از دفع آن‌ها جلوگیری کرد. درواقع فناوری تولید خشک نخستین روش صنعتی به‌کارگیری و تبدیل الیاف سلولوزی با هدف بسته‌بندی است که ازنظر قیمت با مواد پلاستیکی رقابت‌پذیر است. فرایند تولید خشک MFPها،



شکل ۴- بطری ساخته‌شده با فرایند MFPها و الیاف درهم‌فشرده [۲۷].

سرعت، هزینه و کیفیت بهتری در مقایسه با فرایند تر دارد. تولید MFPها بدون چسب یا پیونده ویژه بوده و کامپوزیت تمام‌سلولوزی نامیده می‌شود. همچنین در این فرایند از هیچ حلالی استفاده نمی‌شود. مدول یانگ ۲۰-۱۰ GPa و استحکام کششی نهایی ۲۰۰-۵۰ MPa با تخلخل ۱۰-۳ درصدی در این فرایند قابل‌دست‌یابی است [۲۲].

در نوع دیگری از این کامپوزیت‌ها از الیاف دارای لیگنین استفاده می‌شود. لیگنین در دما و فشار زیاد مانند چسب عمل می‌کند والیاف را بهتر در کنار یکدیگر نگه می‌دارد. همچنین، الیاف لیگنوسلولوزی دارای لیگنین که برای تولید این ظروف استفاده می‌شوند، ازنظر زیست‌محیطی از خمیرهای کاغذ سفید دارای سلولوز تنها مناسب‌ترند (شکل ۴).

جدول ۲، مزایای استفاده از فناوری تولید MFPها در مقایسه

جدول ۲- مقایسه پلاستیک‌های پایه‌نفتی و فراورده‌های الیاف قالب‌گیری‌شده (MFPها) از پسماندهای کشاورزی [؟؟؟؟].

معیار	پلاستیک‌های پایه‌نفتی	MFPها از پسماندهای کشاورزی
منبع مواد اولیه	منابع تجدیدناپذیر پایه‌نفتی	پسماندهای کشاورزی فراوان و تجدیدپذیر
هزینه مواد اولیه	زیاد و وابسته به نوسانات بازار نفت	کم و اغلب برپایه منابع ضایعاتی یا کم‌استفاده
آثار زیست‌محیطی	تخریب‌ناپذیر و عامل اصلی آلودگی	تخریب‌پذیر، سازگار با محیط‌زیست و کاهش دفع پسماند
مصرف انرژی	نیاز به انرژی زیاد در فرایند تولید	مصرف انرژی کمتر در خمیرسازی مکانیکی نیمه‌شیمیایی
ارزش افزوده	استفاده یک‌باره و بدون ارزش افزوده برای سایر بخش‌ها	ایجاد ارزش افزوده برای محصولات جانبی کشاورزی
مقیاس‌پذیری	دارای زیرساخت صنعتی تثبیت‌شده	فناوری نوظهور و توسعه‌پذیر با واحدهای غیرمتمرکز
مدیریت پایان عمر	ماندگاری طولانی‌مدت و بازیافت محدود	تخریب‌پذیر، کمپوست‌پذیر و ایمن برای محیط‌زیست

با پلاستیک‌های پایه‌نفتی برای ساخت ظروف بسته‌بندی را نشان‌می‌دهد. تأمین پایدار مواد اولیه، میزان سرمایه‌گذاری کم، آثار مثبت زیست‌محیطی و مقیاس‌پذیری را می‌توان مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر رویکرد استفاده از الیاف پسماندهای کشاورزی در تولید MFPها برای جایگزینی پلاستیک‌های تهیه‌شده از پلیمرهای پایه‌نفتی به‌عنوان ظروف بسته‌بندی دانست. بااین‌حال، عوامل دیگری مانند قوانین مربوط به ممنوعیت استفاده از پلاستیک‌ها که در اتحادیه اروپا از سال ۲۰۲۰ اجرایی شده و به استفاده از محصولات MFP منجر شده است، گسترش فرهنگ عمومی کاهش مصرف پلاستیک، حمایت‌های دولتی از صنایع کوچک تبدیل پسماندهای کشاورزی به خمیرکاغذ پربازده نیز می‌تواند بر رونق مصرف این محصولات در کشور ایران اثرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

پسماندهای کشاورزی در ایران به‌عنوان منبع عظیم تأمین الیاف لیگنوسلولوزی شناخته می‌شود که به‌طور محدود در بخش تولید خمیرکاغذ و ساخت صفحات فشرده چوبی استفاده شده است. بااین‌حال، توسعه فناوری‌های ساخت ظروف بسته‌بندی قالب‌گیری‌شده، استفاده از این پسماندها را به‌عنوان منبعی دسترس‌پذیر برای تولید خمیرکاغذ مناسب برای ساخت ظروف بسته‌بندی فراهم کرده است. استفاده از این منابع با کاهش مصرف پلاستیک‌های پایه‌نفتی زیست‌تخریب‌ناپذیر و آلاینده محیط‌زیست همراه شده است و خطر ورود میکرو و نانوپلاستیک‌ها را به چرخه زیستی موجودات زنده نیز کاهش می‌دهد.

مراجع

1. Mehndiratta P., Jain A., Srivastava S., and Gupta N., Environmental Pollution and Nanotechnology, *Environ. Pollut.*, **2**, 49, 2013.
2. Bahl S., Dolma J., Singh J.J., and Sehgal S., Biodegradation of Plastics: A State of the Art Review, *Mater. Today*, **39**, 31-34, 2021.
3. Ncube L.K., Ude A.U., Ogunmuyiwa E.N., Zulkifli R., and Beas I.N., Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials, *Materials*, **13**, 4994, 2020.
4. Wang C., Liu Y., Chen W.Q., Zhu B., Qu S., and Xu M., Critical Review of Global Plastics Stock and Flow Data, *J. Ind. Ecol.*, **25**(5), 1300-1317, 2021.
5. Aretoulaki E., Ponis S., Plakas G., and Agalianos K., A Systematic Meta-Review Analysis of Review Papers in the Marine Plastic Pollution Literature, *Mar. Pollut. Bull.*, **161**, 111690, 2020.
6. Zhao J., Lan R, Tan H. et al., Detection and Characterization of Microplastics and Nanoplastics in Biological Samples, *Nat. Rev. Bioeng.*, **21**, 1-15, 2025.
7. Gao Q., Wang Y., Ji Y., Zhao X., Zhang P., and Chen L., Tracking of Realistic Nanoplastics in Complicated Matrices by Iridium Element Labeling and Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy, *J. Hazard. Mater.*, **424**, Part C, 127628, 2022.
8. Zhang P., Wang Y., Zhao X. et al., Surface-Enhanced Raman Scattering Labeled Nanoplastic Models for Reliable Bio-Nano Interaction Investigations, *J. Hazard. Mater*., **425**, 127959, 2022.
9. Leslie H.A., Van Velzen M.J., Brandsma S.H., Vethaak A.D., Garcia-Vallejo J.J., and Lamoree M.H., Discovery and Quantification of Plastic Particle Pollution in Human Blood, *Environ. Int.,* **163**, 107199, 2022.
10. Wang T., Yin P., Yang Y. et al., Effect of Element Iodine on the Cell Membrane Transportability of Fluorescent Polymers and Lysosome-Targeted Cell Imaging, *ACS Sustain. Chem. Eng*., **7**, 6295-303, 2019.
11. Chen Y.C., Chen K.F., Lin K.Y., Chen J.K., Jiang X.Y., and Lin C.H., The Nephrotoxic Potential of Polystyrene Microplastics at Realistic Environmental Concentrations. *J. Hazard. Mater*., **427**, 127871, 2022.
12. Hayyan M., Hashim M.A., and AlNashef I.M., Superoxide Ion: Generation and Chemical Implications, *Chem. Rev*., **116**, 3029-3085, 2016.
13. Qin J., Xia P.F., Yuan X.Z., and Wang S.G., Chlorine Disinfection Elevates the Toxicity of Polystyrene Microplastics to Human Cells by Inducing Mitochondria-Dependent Apoptosis, *J. Hazard. Mater*., **425**, 127842, 2022.
14. Ghasemlou M., Barrow C.J., and Adhikari B., The Future of Bioplastics in Food Packaging: An Industrial Perspective, *Food Packag. Shelf Life.*, **43**, 101279, 2024.
15. Stanley J., Culliton D., Jovani-Sancho A.-J., and Neves A.C.,

The Journey of Plastics: Historical Development, Environmental Challenges, and the Emergence of Bioplastics for Single-Use Products, *Eng*, **6**, 17, 2025.

16. Silva A.L.P., Prata J.C., Walker T.R. et al., Increased Plastic Pollution Due to COVID-19 Pandemic: Challenges and Recommendations, *Chem. Eng. J.*, **405**, 126683, 2021.
17. Khoshnevisan B., Duan N., Tsapekos P. et al., A Critical Review on Livestock Manure Biorefinery Technologies: Sustainability, Challenges, and Future Perspectives, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **135**, 110033, 2021.
18. Agbor V.B., Cicek N., Sparling R., Berlin A., and Levin D.B., Biomass Pretreatment: Fundamentals Toward Application, *Biotechnol. Adv.*, **29**(6), 675-685, 2011.
19. Lin C.S.K., Pfaltzgraff L.A., Herrero-Davila L. et al., Food Waste as a Valuable Resource for the Production of Chemicals, Materials and Fuels. Current Situation and Global Perspective, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 426-464, 2013.
20. Sheldon R.A., Green and Sustainable Manufacture of Chemicals from Biomass: State of the Art, *Green Chem.*, **16**, 950-963, 2014.
21. Dechent S.E., Kleij A.W., and Luinstra G.A., Fully Bio-Derived CO_2 Polymers for Non-Isocyanate Based Polyurethane Synthesis, *Green Chem.*, **22**, 969-978, 2020.
22. Zhang Y., Duan C., Bokka S.K., He Z., and Ni Y., Molded Fiber and Pulp Products as Green and Sustainable Alternatives to Plastics: A Mini Review, *J. Bioresour. Bioprod.*, **7**, 14-25 2021.
23. Tye Y.Y., Lee K.T., Abdullah W.N.W., and Leh C.P., The World Availability of Non-Wood Lignocellulosic Biomass for the Production of Cellulosic Ethanol and Potential Pretreatments for the Enhancement of Enzymatic Saccharification, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **60**, 155-172, 2016.
24. Schluttenhofer C. and Yuan L., Challenges Towards Revitalizing Hemp: A Multifaceted Crop, *Trends Plant Sci.*, **22**, 917-929, 2017.
25. Najafabadi M.M., Mirzaei A., Laskookalayeh S.S., and Azarm H., An Investigation of the Relationship Among Economic Growth, Agricultural Expansion and Chemical Pollution in Iran Through Decoupling Index Analysis, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **29**, 76101-76118, 2022.
26. Rosenboom J-G., Langer R., and Traverso G., Bioplastics for a Circular Economy, *Nat. Rev. Mater.*, **7**, 117-137, 2022.
27. Gata A.J., The PulPac Technology Can Be Used to Make Most Types of Rigid Packaging and Single-Use Products, 2022.