مروری بر اهمیت نانوذرات نشاسته در بسته‌بندی مواد غذایی: کاربرد و روش‌های تولید

غزل یحیی زاده الیزایی[۱]، عباس عابدفر[۱*]

[۱] گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، جایگزینی مواد بسته‌بندی زیست تخریب پذیر با مواد پلاستیکی مرسوم جهت کاهش نگرانی‌های زیست محیطی مورد توجه قرار گرفته است. بسته بندی غیرفعال یا سنتی مواد غذایی امروزه با استفاده از فناوری نانو برای تولید بسته‌بندی‌های هوشمند، تعاملی و پاسخگو با عملکردهای بهبود یافته، به سمت بسته بندی فعال یا نوآورانه مواد غذایی تغییر جهت داده است. نانو مواد و پوشش‌های خوراکی که نانو ذرات به آن‌ها اضافه شده است، نسبت به مواد بسته‌بندی معمولی در حفظ و نگهداری بهتر محصولات غذایی سودمندتر هستند. نانو نشاسته، شکل اصلاح شده بیوپلیمر نشاسته، به عنوان یک گزینه تجدید پذیر و زیست تخریب پذیر در صنعت بسته بندی مواد غذایی ظهور کرده است. استفاده از نانو ذرات نشاسته در فیلم‌های بسته بندی مواد غذایی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به عنوان راهکاری امیدوارکننده فرصت‌های مختلفی را برای بهبود کیفیت و توسعه محصولات نوآورانه ارائه می‌دهد. نانوفیلم‌های بر پایه‌ی نشاسته استحکام مکانیکی تقویت شده، ویژگی‌های سدگری بهتر در برابر رطوبت، اکسیژن و سایر گازها را نشان می‌دهند و به افزایش ماندگاری غذاهای بسته‌بندی شده کمک می‌کنند. هدف این مقاله شناسایی روش‌های مختلف برای تولید نانو ذرات نشاسته است و نقش آن را در توسعه راه حل‌های بسته بندی پایدار و دوستدار محیط زیست بررسی می‌کند و بر مزایای آن از جمله مقرون به صرفه بودن، زیست تخریب پذیری و در دسترس بودن آن تاکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: *نانو ذرات نشاسته، بسته بندی مواد غذایی، فیلم‌های زیست تخریب پذیر*

ایمیل نویسنده مسئول: a.abedfar@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

نشاسته، پلیمری از کربوهیدرات طبیعی است که به وفور توسط گیاهان تولید می شود و به عنوان منبع تجدید پذیر انرژی در آن‌ها ذخیره می‌شود. شکل و ساختار دانه‌های نشاسته در گیاهان مختلف و بسته به شرایط آب و هوایی منطقه متفاوت است. دو درشت مولکول آمیلوز و آمیلوپکتین در نسبت‌های نابرابر نشاسته را تشکیل می‌دهند. این نسبت بر ویژگی‌های عملکردی نشاسته، از جمله ژلاتینه شدن، ویسکوزیته و پایداری ژل آن تأثیر می‌گذارد.

نشاسته به طور گسترده در کاربردهای غذایی و صنعتی استفاده می شود، اما دارای محدودیت‌هایی مانند پایداری حرارتی کم، شکنندگی و ماهیت آبدوست و خاصیت ژل کنندگی است که استفاده از آن در مقیاس بزرگ را محدود می کند. اصلاحات از طریق روش‌های فیزیکی، شیمیایی یا آنزیمی اغلب برای افزایش عملکرد آن ضروری است [۳-۱].

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۱۰/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

در صورتی که نشاسته از یک گیاه استخراج شود، به آن «نشاسته بومی» می‌گویند، و اگر تحت یک یا چند تغییر اصلاحی برای دستیابی به ویژگی‌های خاص قرار بگیرد، به عنوان «نشاسته اصلاح شده» طبقه بندی می‌شود [۴]. هدف از اصلاح نشاسته دستیابی به ویژگی‌های کاربردی مختلف مانند بهبود جذب آب، مقاومت در برابر حرارت، کاهش سینرژی در محصولات غذایی و بهبود قوام محصول است [۳].

۲- نانو ذرات نشاسته

مطالعات زیادی روی اندازه ذرات نشاسته و بررسی رابطه بین خواص نانو و خواص میکروسکوپی مواد مختلف انجام شده است. در این تحقیقات، ذرات با اندازه‌های کوچک‌تر با سطح مقطع بزرگ‌تر تولید می‌شوند. یکی از روش‌های جدید و موثر در این زمینه، تغییر ساختار درشت مولکول‌های نشاسته از مقیاس میکرو به نانو است که باعث تولید نانونشاسته می‌شود. این فرآیند نه تنها اندازه ذرات را کاهش می‌دهد، بلکه خواص عملکردی آن‌ها را نیز بهبود می‌بخشد.

نانونشاسته‌ها به دو نوع تقسیم می‌شوند:

نانوکریستال‌های نشاسته (SNCs): بخش‌های کریستالی که با تخریب نواحی آمورف (غیرکریستالی) در گرانول‌های نشاسته ایجاد می‌شوند.

نانوذرات نشاسته (SNPs): ذراتی که از نشاسته ژلاتینه شده به دست می‌آیند و ممکن است شامل نواحی آمورف نیز باشند [۵].

استفاده از ذرات نانومتری (۱۰۰-۱ نانومتر) بر پایه نشاسته،ارائه یک فناوری بسته‌بندی مدرن و منحصر به فرد را ممکن می‌سازد که به عنوان مواد بسته‌بندی تقویت شده با نانو شناخته می‌شود. این نوع مواد بسته بندی جرم مولکولی کمتر و انعطاف پذیری خوبی دارند و زیست تخریب پذیر هم هستند. علاوه بر این، استحکام کششی آن‌ها مشابه پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) است. همچنین، این نوع از سیستم‌های بسته‌بندی نانو به عنوان یک مانع در برابر رطوبت، اکسیژن و میکروارگانیسم‌ها بهتر عمل می‌کند [۱].

ذرات نانو نشاسته (SNPs) به ذراتی گفته می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها در محدوده نانومتری (در منابع مختلف بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر یا تا ۱۰۰۰ نانومتر) قرار دارد [۶-۵ و ۱] اما از یک مولکول تکی بزرگتر هستند [۵]. همچنین در بسیاری از منابع علمی ذکر شده که حداقل یکی از ابعاد این ذرات از ۳۰۰ نانومتر بیشتر نباشد. لو کور و همکاران [۵] گزارش دادند که مورفولوژی و ویژگی نانوذرات حاصل به گیاه منبع بستگی دارد. این ذرات به دلیل داشتن نسبت سطح به جرم بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶].

به طور کلی، آماده‌سازی SNPs به دو روش "بالا به پایین" و "پایین به بالا" طبقه‌بندی می‌شود. روش‌های بالا به پایین مانند فراصوت، هموژن‌سازی، تابش اشعه گاما، هیدرولیز اسیدی و دیگر روش‌ها خرد شدن ذرات بزرگتر و تبدیل آن‌ها به ذرات کوچکتر را شامل می‌شود که توسط تکه تکه سازی ساختاری و با استفاده از نیروی مکانیکی و شیمیایی انجام می‌شود. در مقابل، روش‌های پایین به بالا نانوذرات را با استفاده از فرآیند ترمودینامیکی، که در آن خودآرایی اتم‌ها و مولکول‌ها به شیوه‌ای کنترل شده تنظیم می‌شود تولید می‌کنند. روش‌های بالا به پایین متداول ترین روش برای تولید نانوذرات هستند. مزایای استفاده از روش‌های بالا به پایین استفاده آسان آن است، اما برای تولید ذرات با اندازه و شکل مناسب بی‌فایده هستند. روش‌های پایین به بالا در بازده بالا و زمان کوتاه نانوذراتی با شکل و اندازه

قابل کنترل تولید می‌کنند. این روش به معرف های شیمیایی خاص و تجهیزات پیشرفته نیاز دارد. انتخاب روش تولید به اندازه ذرات مورد نظر و مقیاس تولید بستگی دارد. روش‌های بالا به پایین کارآمدتر هستند اما ذرات بزرگتری تولید می‌کنند، در حالی که با استفاده از روش‌های پایین به بالا می‌توان ذرات کوچکتری به دست آورد [۷ و ۵]. ویژگی نانوذرات نشاسته نسبت به نوع میکرومتری خود تغییر می‌کند که ناشی از سطح افزایش یافته آن‌هاست. افزایش جذب آب، کاهش جذب روغن، از دست دادن بلورینگی، بهبود پایداری حرارتی و خواص آنتی اکسیدانی در نانو نشاسته مشاهده شده است [۸].

برخی محققان گزارش داده‌اند که نانوذرات نشاسته می‌توانند به عنوان پرکننده در کامپوزیت‌ها استفاده شوند و ویژگی های مکانیکی و زیست تخریب پذیری را بهبود ببخشند .بر اساس مطالعات متعدد، SNPها یک جایگزین امیدوارکننده برای تشکیل امولسیون‌های پایدار، حامل‌های ترکیبات زیستی فعال و مواد بسته بندی موثر برای تولید فیلم‌های غذایی با مقاومت زیاد در برابر عوامل مکانیکی هستند [۵ و۷].

۳-روش های تولید نانو ذرات نشاسته

۳-۱-روش اسیدی

هیدرولیز اسیدی سال‌هاست که برای تهیه SNP با استفاده از اسیدهای ضعیف و شرایط دمایی زیر محدوده ژلاتینه شدن نشاسته استفاده می‌شود. اسیدهای معدنی شامل اسید اگزالیک، اسید سولفوریک و اسید کلریدریک برای این مورد به کار می‌روند، اگرچه اسید سیتریک نیز در دماهای بین ۲۵ تا ۵۵ درجه سانتیگراد استفاده شده است [۴]. تهیه SNP توسط هیدرولیز اسیدی به عوامل متعددی از جمله غلظت نشاسته، غلظت اسید، دما، هم زدن و مدت زمان هیدرولیز بستگی دارد [۵-۴]. این فرآیند به عنوان هیدرولیز اسیدی ناحیه آمورف (غیرکریستالی) گرانول‌های نشاسته توصیف شده است، بدون اینکه بخش‌های کریستالی گرانول تخریب شوند. هیدرولیز اسیدی در سه مرحله انجام می‌شود:

- فرسایش سطح گرانول
- فروپاشی دیواره گرانول به دلیل نفوذ اسید
- تکه‌تکه شدن لایه های داخلی

با این حال، هیچ مطالعه‌ای درباره میزان آمیلوز و آمیلوپکتین در نانونشاسته‌ها انجام نشده است [۶].

در فرآیند هیدرولیز SNPs معمولاً از شرایط بهینه‌ای استفاده می‌شود که شامل استفاده از H_2SO_4 ۳/۱۶ مولار یا HCl ۲/۲ مولار در دمای ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت تا چند روز است. دالاریا و همکاران گزارش کردند که تهیه SNPهای نشاسته شاه‌بلوط آبی با هیدرولیز اسیدی و استفاده از اسید سولفوریک ۳/۱۶ مولار به مدت ۷ روز در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۷/۵ درصد SNP تولید کرد. در یک مطالعه دیگر نشان داده شد که استفاده از اسید سولفوریک در نشاسته ماش، بازده ۳۲/۲ درصدی تولید SNP را به همراه داشت. در مطالعه‌ای دیگر گروهی از اسید کلردریک ۲/۲ مولار استفاده کردند و بازده بالای ۸۰ درصد را در نشاسته ساگو به دست آوردند. آنجلیه و همکاران گزارش دادند که بازده هیدرولیز هنگام استفاده از سولفوریک اسید در مقایسه با اسید کلردریک پایین‌تر بود، با این حال زمان تولید SNP کمتر بود؛ اما روش آن‌ها نشان داد که سوسپانسیون نهایی در صورت استفاده از سولفوریک اسید به دلیل

حضور گروه‌های سولفاتی روی سطح SNPها پایدارتر است [۵].

۳-۲-روش آنزیمی

روش دیگری برای تولید SNP که شامل استفاده از آنزیم‌ها برای جداسازی زنجیره‌های نشاستهای است، با آنزیم‌هایی مانند بتا آمیلاز، آلفا آمیلاز، گلوکوآمیلاز و پولولاناز انجام شده است [۴]. هیدرولیز توسط آلفا آمیلاز، باعث برش تصادفی پیوندهای گلیکوزیدی آلفا ۱-۴ در زنجیره‌های آمیلوز و آمیلوپکتین می‌شود. این هیدرولیز آنزیمی منجر به ایجاد ترک و فرسایش گرانول‌های نشاسته می‌شود و در نتیجه اندازه ذرات نشاسته با درجه مناسب هیدرولیز آنزیمی کاهش می‌یابد. کیم و همکاران گزارش دادند که نشاسته مومی برنج هیدرولیز شده با استفاده از آمیلاز دارای اندازه ۵۰۰ نانومتر و شکل نامنظم است. SNPهای تولید شده با شکل نامنظم توسط هیدرولیز آنزیمی در ذرت مومی و دانه نیلوفر آبی نیز یافت شدند. آنزیم پولولاناز قادر است پیوندهای گلیکوزیدی آلفا ۶-۱ را هیدرولیز کرده و زنجیره‌های کوتاه خطی از آمیلوپکتین آزاد کند [۵]. سون و همکارانش استفاده از آنزیم پولولاناز را در تولید نانوذرات نشاسته ذرت مومی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها موفق به تولید نانوذراتی در محدوده ۶۰ تا ۱۲۰ نانومتر شدند که دارای بلورینگی نسبی نزدیک به ۵۵ درصد و بازده بیش از ۸۵ درصد بود. میائو و همکارانش نیز از پولولاناز برای ژلاتینه کردن نشاسته ذرت مومی استفاده کردند و مشاهده کردند که زمان و غلظت آنزیم ممکن است نسبت نواحی آمورف و بلوری را تغییر دهد [۶]. قطعات خطی نشاسته تولید شده توسط آنزیم‌های زنجیره شکن، در طی رتروگراداسیون نشاسته، دوباره به هم متصل می‌شوند و ساختارهای کریستالی بیشتری ایجاد می‌کنند. این تبلور مجدد گلوکان‌های خطی به دنبال شاخه زدایی از نشاسته بومی نیز برای تولید SNPها مورد استفاده قرار گرفته است. تبلور نانوذرات با تبلور مجدد افزایش یافت با افزایش زمان تبلور مجدد، تعداد کریستال‌های به‌دست‌آمده کاهش یافت. با این حال، کریستال‌های حاصل از این روش، استحکام کمتری نسبت به نانوکریستال‌های تولیدشده توسط هیدرولیز اسیدی داشتند. پیش‌تیمار آنزیمی در ترکیب با هیدرولیز اسیدی، زمان تولید را از روزها به ساعت‌ها کاهش و بازدهی را افزایش می‌دهد [۴].

در مطالعه‌ای دیگر، تولید SNP از نشاسته ذرت، سیب‌زمینی و کاساوا نشان داد که نانوذرات تولیدشده با روش هیدرولیز اسیدی اندازه‌ای بسیار کوچک‌تر نسبت به هیدرولیز آنزیمی داشتند [۹].

۳-۳-روش نانو رسوب

این روش شامل افزودن تدریجی محلول‌های پلیمری آبی یا غیرحلال‌ها به محلول پلیمری است. برای تهیه SNP توسط نانو رسوب، زنجیره مولکولی نشاسته باید از قبل به طور کامل در حلال پراکنده شود و این فرآیند بر اساس رسوب زیست‌پلیمر در رابط حلال و جابجایی حلال‌های نیمه‌قطبی قابل امتزاج با آب در محیط چربی‌دوست انجام می‌شود. SNPها معمولاً با رسوب محلول خمیر نشاسته با استفاده از اتانول، پروپانول، ایزوپروپانول یا بوتانول تهیه می‌شوند [۵]. مزایای این روش بدست آوردن ذرات نانومتری همگن بیشتر و استفاده کمتر از حلال‌های سمی است. نانو رسوب در مقایسه با سایر روش‌ها فناوری امیدوارکننده‌تری است، زیرا روشی ساده، با هزینه کم و خطر آلودگی کمتر نمونه است [۶].

۳-٤-روش تابش اشعه گاما

این روش توانایی شکستن مولکول‌های بزرگ نشاسته به قطعات کوچکتر را دارد و پیوندهای گلیکوزیدی را تجزیه می‌کند، که این ویژگی‌ها آن را برای تولید نانوذرات نشاسته مناسب می‌سازد. در این روش، ابتدا نشاسته با آب جوشانده و به‌صورت یک خمیر همگن در می‌آید. سپس این سوسپانسیون تحت تابش اشعه گاما قرار می‌گیرد، که منجر به تولید رادیکال‌های آزاد فعال شده و فرآیند هیدرولیز نشاسته آغاز می‌شود. شکستگی در بخش‌های آمورف نشاسته اتفاق می‌افتد، نواحی کریستالی کمتر آسیب می‌بینند و در نتیجه ذرات به‌صورت خردشده ایجاد می‌شوند. نانوذرات تولیدشده با این روش اغلب قطری کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارند [۴]. تهیه SNP با این روش بر روی منابع مختلف نشاسته، مانند نشاسته کاساوا و ذرت مومی، با کاربرد کلی دوز ۲۰ کیلوگری آزمایش شده و اندازه ذرات حاصله ۲۰ تا ۵۰ نانومتر گزارش شده است [۵].

۳-۵-روش هموژنیزاسیون با فشار بالا (HPH)

روش هموژنیزاسیون با فشار بالا بر پایه اعمال سرعت بالا و نرخ برش جریان محصول عمل می‌کند. احمد و همکاران در فشار ۲۵۰ مگاپاسکال HPH را انجام دادند و گزارش کردند که فرآیند همگن سازی مکرر می تواند منجر به کاهش قابل توجه اندازه ذرات شود. فشار اعمال شده، غلظت و منبع نشاسته و دوره انجام فرآیند، همگی بر نحوه واکنش نشاسته به HPH تأثیر می‌گذارند. تغییرات کیفی نشاسته به دلیل فرآیندهای مختلف ناشی از فشار مشاهده شده است[۵-۴] تولید نانوذرات نشاسته با استفاده از HPH روی نشاسته ذرت با آمیلوز بالا مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج در این تحقیق، کوچکترین ذره‌ی تولید شده، با اندازه ۵۴۰ نانومتر، پس از ۴ سیکل همگن سازی در ۲۵۰ مگاپاسکال به دست آمد. این تحقیق اثربخشی روش مکانیکی غیرحرارتی در کاهش اندازه ذرات را تأیید کرد. همچنین، در فشار ۲۵۰ مگاپاسکال آسیب به ساختار نشاسته و تخریب ساختار آمیلوپکتین نیز مشاهده شد [۱۰].

۳-٦-روش فراصوت

در این روش از امواج صوتی با فرکانس بالاتر از آستانه شنوایی انسان (بیش از ۱۶ کیلوهرتز) استفاده می‌شود. امواج فراصوت انرژی مکانیکی ایجاد می‌کنند که باعث تجزیه ذرات نشاسته به ذرات کوچک‌تر می‌شود. این انرژی مکانیکی همچنین حباب‌های میکروسکوپی در محلول ایجاد می‌کند که با فروپاشی سریع خود، دما و فشار بالایی تولید می‌کنند. این حباب‌ها به سرعت فرو می‌ریزند و فشار و دمای بالایی تولید می‌کنند که می‌تواند به شکستن مولکول‌های نشاسته به ذرات کوچکتر کمک کند. علاوه بر این، انرژی مکانیکی فراصوت نیز باعث ایجاد تنش هیدرودینامیکی در محلول می‌شود که می‌تواند به تشکیل ذرات کوچک کمک کند. آماده سازی SNP توسط فراصوت در دما، شدت و زمان‌های مختلف انجام می‌شود. به طور کلی، مطالعات متعددی از توان ۲۴ کیلوهرتز به مدت ۷۵ دقیقه استفاده کرده‌اند که در آن‌ها با افزایش زمان فرایند فراصوت کاهش اندازه ذرات انجام می‌شود [۵]. در مطالعه‌ای از امواج فراصوت در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز استفاده شد و نانوذرات نشاسته از ذرت، کاساوا و یام (سیب زمینی هندی) به ترتیب دارای اندازه در محدوده ۶۸-۳۶ نانومتر، ۳۵-۶۵ نانومتر و ۸-۳۲ نانومتر بودند [۶]. در میان روش‌های فیزیکی مختلف، فراصوت به دلیل بازده بالا، سرعت و عدم نیاز به مواد شیمیایی، روشی

بسیار امیدوارکننده محسوب می‌شود. بازده این روش نزدیک به ۱۰۰٪ است، فرآیند آن نسبتاً ساده بوده و نیاز به مراحل تصفیه پیچیده ندارد [۵].

۳-۷-روش آسیاب کردن

آسیاب یک روش سازگار با محیط زیست برای تولید نانوذرات نشاسته است که ممکن است مستقیماً بر خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته تأثیر بگذارد و در نتیجه نانوذرات آمورف بیشتری ایجاد کند. در تولید نانوذرات نشاسته ذرت که با استفاده از روش آسیاب مکانیکی همزن‌دار انجام شد، اندازه ذرات در محدوده ۲۶۶/۴ تا ۳۰۹/۸ نانومتر و ۷۰۰ نانومتر گزارش شد. نتایج این مطالعات نشان داد که با افزایش زمان آسیاب، بلورینگی نانوذرات به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۶].

روش تولید	شکل ذرات	اندازه ذرات (نانومتر)
فراصوت	پلاکتی یا گرانولی	۳۰ تا ۱۰۰
نانو رسوب	کروی	۱۳۵ تا ۱۵۵
هیدولیز اسیدی	نانوپلاکتی	۱۰۷
آسیابی	شبه ژل	۲۴۵
هیدرولیز آنزیمی	نامنظم	۲/۴ تا ۶/۷
فراصوت	پلاکتی	۴۰
هموژنیزاسیون	گرانولی کوچک	۵۴۰

جدول ۱. ویژگی ذرات نانونشاسته تولید شده با چند روش مختلف از گیاه ذرت [۴].

٤- ویژگی نانو ذرات نشاسته

٤-۱-محتوای آمیلوز

محتوای آمیلوز نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های SNP، از جمله تشکیل ژل و چسبندگی بازی می‌کند. این ویژگی‌ها تحت تأثیر گیاه منبع و روش‌های تولید هستند. هیدرولیز اسیدی می‌تواند محتوای آمیلوز را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، در حالی که روش هایی مانند نانورسوب با الکل‌ها یا هموژن سازی با فشار بالا ممکن است با بازآرایی مجدد نواحی کریستالی یا آزاد کردن مولکول‌های آمیلوز آن را افزایش دهند [۱۱ و ۵].

٤-۲-شکل و اندازه ذرات

مورفولوژی SNP به گیاه منبع و روش‌های آماده سازی بستگی دارد که از شکل‌های گرد و مسطح تا شکل های نامنظم متغیر است. اندازه ذرات متفاوت است، معمولاً بین ۳۰ تا ۲۵۰ نانومتر استکه تحت تأثیر منبع نشاسته و روش‌های تولید (مانند اولتراسوند، هیدرولیز اسیدی، پرتودهی گاما) قرار دارد. فراصوت ساختار گرانول‌ها را مختل می‌کند، در حالی که هیدرولیز اسیدی باعث فرسایش نواحی اسیدی می‌شود و ذراتی در مقیاس نانو تولید می‌کند. روش های ترکیبی، مانند هیدرولیز اسیدی با رسوب، اندازه ذرات و مورفولوژی را بیشتر مورد اصلاح قرار می‌دهند [۵].

در مطالعه‌ای بر روی اندازه نانو ذرات بدست آمده از شاه بلوط هندی، شاه بلوط آبی و ساقهٔ نیلوفر آبی، کوچکترین نانوذرات متعلق به شاه بلوط آبی بودند که می‌تواند به علت تفاوت در الگوی انشعاب آمیلوپکتین در نشاسته آن باشد [۱۲].

٤-۳-بلورینگی نشاسته

بلورینگی که عمدتاً به آمیلوپکتین نسبت داده می شود، بر اساس نوع نشاسته و روش تهیه متفاوت است. روش‌های فیزیکی مانند پرتودهی گاما، فراصوت و هموژنیزاسیون با فشار بالا اغلب باعث کاهش بلوری شدن می‌شوند. با این حال، روش‌های خاص (مثلا نانو رسوب) می توانند کریستالی بودن را افزایش دهند. هیدرولیز آنزیمی به دنبال تبلور مجدد، عمدتاً با هدف قرار دادن نواحی آمورف بلورینگی و تشکیل الگوهای کریستالی جدید را افزایش می‌دهد [۵-۴].

مطالعه‌ای بر روی نانوذرات نشاسته از چندین منبع مختلف که با استفاده از روش قلیایی ملایم و فراصوت انجام شد نیز میزان بلورینگی کاهش یافت که می‌تواند به علت افزایش نواحی آمورف در پی کاهش اندازه ذرات باشد [۱۲].

٤-٤-ویژگی‌های حرارتی

پایداری حرارتی و خواص ژلاتینه شدن تحت تأثیر روش‌های آماده‌سازی است. روش‌های فیزیکی مانند فراصوت و پرتودهی گاما پایداری حرارتی را کاهش می‌دهند، در حالی که روش HPH ممکن است کمی آن را افزایش دهد [۵].

در آزمایشی دیگر استفاده از روش فراصوت منجر به اختلالی قابل توجه در ساختار کریستالی آمیلوپکتین و افزایش زنجیره هیدروکربنی دانه‌های نشاسته شد که می‌تواند با افزایش پیوندهای واندروالس و هیدروژنی با پایداری بیشتر و دمای ذوب بالاتر ارتباط داشته باشد [۱۲].

٤-٥-ویژگی‌های عملکردی

در مقایسه با نشاسته بومی، نانو ذرات نشاسته تورم و حلالیت بیشتری را نشان می‌دهند که در نتیجه تغییرات خاص بسته به روش تولید ایجاد می‌شود. با این حال، ظرفیت اتصال به آب ممکن است پس از هیدرولیز اسیدی کاهش یابد [۵].

بشیر و هاریپریا گزارش دادند که ظرفیت تورم نمونه‌های نشاسته گندم کامل پرتودهی شده با اشعه گاما در دوزهای مختلف به طور چشمگیری افزایش یافت. مشخص شد که تورم نشاسته ناشی از تجزیه زنجیره آمیلوپکتین است [۴].

۵- ویژگی و نقش فیلم‌های نانونشاسته در بسته بندی مواد غذایی

بسته بندی مواد غذایی به عنوان یک ابزار بازاریابی برای محصولات غذایی در صنعت در نظر گرفته می شود و همچنین به جلب توجه مصرف کنندگان کمک می کند. هدف اصلی بسته بندی مواد غذایی، انتقال اطلاعات، نگهداری، حفاظت، سهولت در جابجایی و حمل و نقل است. بسته بندی مواد غذایی از مواد مختلفی تشکیل شده که ممکن است شامل پلاستیک، ورق‌های پوشش داده شده، فیلم‌ها، کاغذ، فلزات و غیره باشد. برخی از این مواد مانند پلاستیک وقتی دور ریخته می شوند بر محیط زیست تأثیر می‌گذارند و به طور جدی به اکوسیستم آسیب می‌رسانند زیرا از پلی اتیلن، پلی استایرن و پلی وینیل کلراید تشکیل شده‌اند. از این رو، آن‌ها به عنوان خطری برای محیط زیست در نظر گرفته می‌شوند [۱]. بسته‌بندی سنتی یا غیرفعال مواد غذایی امروزه به سمت بسته‌بندی فعال یا نوآورانه در حال حرکت است، که با بهره‌گیری از فناوری نانو، بسته‌بندی‌های هوشمند، تعاملی و پاسخ‌گو با عملکردهای بهبودیافته تولید می‌شود [۱۳]. بسته‌بندی

مواد غذایی را می‌توان با استفاده از نانومواد عملکردی بهبود داد که شامل بهبودهای فیزیکوشیمیایی مانند پایداری دما و رطوبت، خواص سدگری، استحکام مکانیکی، دوام و انعطاف‌پذیری می‌شود. همچنین می‌توان با استفاده از نانومواد دارای عملکردهای فعال مانند خواص ضدمیکروبی، آنتی‌اکسیدانی، محافظت در برابر UV و غیره، یا نانوسنسورها با عملکردهای هوشمند برای تشخیص گازها و مولکول‌های آلی کوچک بسته‌بندی را ارتقا داد. بهبودهای زیستی مانند زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری، بسته‌بندی با ضایعات کم و دوستدار محیط‌زیست (بسته‌بندی زیست‌پایه) نیز از طریق ترکیب نانومواد زیستی قابل دستیابی است. استفاده از مواد نانوساختار یا اصلاح شده نانو روشی امیدوارکننده برای افزایش و تضمین ماندگاری یک محصول غذایی است. پلیمرهای پلاستیکی تجزیه ناپذیر که معمولاً به عنوان بسته بندی استفاده می‌شوند، می‌توانند با بسته بندی‌های زیست تخریب پذیر و زیست سازگار جایگزین شوند. پرکننده‌ها در مقیاس نانو برای بهبود عملکرد نانوکامپوزیت‌ها و خواص مختلف آن‌ها مانند خواص سدگری، مکانیکی و حرارتی در طول فرآوری، نگهداری و حمل و نقل مواد غذایی استفاده شده‌اند. ماهیت نشاسته و ساختار منسجم آن تحت تأثیر روش‌های فرآوری، شرایط محیطی، نوع نرم کننده (پلاستیسایزر)، ضخامت و سایر عوامل، تعیین کننده خواص فیلم هاست [۱۴].

فیلم‌های زیست تخریب پذیر بر پایهٔ نشاسته باید بادوام باشند. یکی از عملکردهای اصلی نانومواد بر پایهٔ نشاسته، کاهش ضعف نشاسته به عنوان پلیمری طبیعی است [۱۵].

در ادامه برخی از خواص تقویت یافته این فیلم‌ها در نتیجه افزودن نانو ذرات نشاسته ذکر شده‌اند.

ویژگی‌های متعدد فیلم‌های بر پایهٔ نشاسته با به کارگیری نانو ذرات نشاسته

شکل ۱. ویژگی‌های فیلم‌های بر پایهٔ نشاسته با به کارگیری نانو ذرات نشاسته.

۵-۱-ریخت شناسی

توزیع همگن نانوذرات برای بهبود موثر خواص سدگری فیلم‌ها مورد نیاز است. در مطالعه‌ای فیلم‌های نانوکامپوزیت نشاسته ذرت با ترکیب SNP در غلظت‌های مختلف تولید شد. مشاهده شد که سطح فیلم‌های نشاسته‌ای بومی صاف به نظر می‌رسد، در حالی که پس از افزودن نانوذرات به فیلم‌های کامپوزیتی، زمانی که غلظت SNP از ۲۰ به ۲۵ درصد افزایش یافت، سطحی زبر در فیلم‌ها ایجاد شد [۱۶]. برای فیلم‌های نانوکامپوزیت نشاسته نخود، نانوذرات نشاسته به طور یکنواخت در غلظت‌های مختلف پخش شدند. در غلظت ۵ درصد، سطح فیلم صاف و فشرده می‌شود بدون اینکه تجمعی از نانوذرات دیده شود، اما در صورت افزایش نانو ذرات از ۷ درصد به ۹ درصد، سطح فیلم‌ها زبرتر می‌شود. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که فیلم‌های نشاسته بومی دارای تخلخل بالایی هستند، با افزایش غلظت نانو نشاسته، تخلخل لایه به دلیل افزایش تراکم کاهش می‌یابد. غلظت کمتر نانوذرات نشاسته می‌تواند منجر به توزیع

همگن‌تر در زمینهٔ نشاسته در مقایسه با محتوای بالاتر شود. فضای بین ساختارهای سه بعدی فیلم‌های بر پایه‌ی نشاسته تبدیل به ساختار پایه‌ای برای نانو پر کننده‌هایی می‌شود که باعث بهبود ویژگی‌های مختلف فیزیکوشیمیایی فیلم‌ها می‌شوند [۱۷].

۵-۲-ضخامت

ضخامت فیلم عاملی است که بر خواص مکانیکی، کدورت، نفوذپذیری بخار آب و زیست‌تخریب‌پذیری فیلم‌های بر پایه نشاسته تأثیر می‌گذارد. ضخامت فیلم بستگی به روش‌های آماده سازی، شرایط خشک کردن، و ترکیب بیوپلیمرها دارد. فیلم‌های ضخیم‌تر به‌طور کلی کدرتر هستند و مقدار کدری کمتر از ۶/۰۳ واحد جذب در نانومتر نشان‌دهنده شفافیت است. یکنواختی ضخامت فیلم برای اطمینان از دقت آزمایش‌های مکانیکی و ارزیابی ویژگی‌های عملکردی ضروری است. مطالعات نشان می‌دهد که افزودن نانو نشاسته به دلیل تخریب زنجیره آمیلوز در طی هیدرولیز اسیدی و واکنش‌های تراکمی تقویت‌شده، ضخامت لایه را افزایش می‌دهد. برای مثال، ضخامت لایه‌های نشاسته شاه بلوط و ماش با افزایش غلظت نانو نشاسته، افزایش می‌یابد. فیلم‌های نشاسته‌ای ساگو تقویت‌شده با نانوذرات به مقدار ۴ تا ۶ درصد نیز افزایش ضخامت قابل‌توجهی را به دلیل تعاملات پلیمری-پرکننده‌های نانومتری نشان داده‌اند. این روند برای منابع مختلف نشاسته از جمله لوبیا قرمز تایید شده است [۱۷].

۵-۳-حل پذیری

برای فیلم‌های بر پایهٔ نشاسته، حلالیت فیلم ویژگی مهمی است. برای تعیین زیست تخریب پذیری فیلم‌ها برای بسته بندی مواد غذایی این عامل بسیار مهم است [۷]. این ویژگی مقاومت در برابر آب، یکپارچگی در طول نگهداری و زیست تخریب پذیری آن‌ها را تعیین می‌کند.

فیلم‌های با حلالیت بالا برای بسته‌بندی مواد غذایی خشک که قبل از مصرف نیاز به هیدراته شدن دارند، ایده‌آل هستند، در حالی که فیلم‌ها با حلالیت کمتر باعث افزایش پایداری و مقاومت در برابر رطوبت می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد افزودن نانوذرات نشاسته (SNPs) به فیلم‌ها قابلیت حل شدن آن‌ها را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. این کاهش به دلیل تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی بین گروه‌های هیدروکسیل نانوذرات و زنجیره‌های نشاسته است. به عنوان مثال، فیلم‌های نشاسته شاه بلوط آبی بومی در مقایسه با فیلم‌های نانوکامپوزیتی حلالیت بالاتری را نشان دادند. در این فیلم‌ها با افزایش غلظت SNP حلالیت کاهش یافت و به حداقل انحلال در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد SNP رسید. روندهای مشابهی در فیلم‌های نشاسته ذرت، فیلم‌های نشاسته ماش و فیلم‌های نشاسته نخود حاوی نانوذرات نشاسته سیب‌زمینی مشاهده شد. کاهش قابلیت حل شدن به ماهیت کریستالی نانوذرات و تعاملات آن‌ها با زمینه نشاسته‌ای نسبت داده می‌شود که جذب آب و تورم را محدود می‌کند. جالب توجه است که غلظت‌های بالاتر نانوذرات نشاسته، بیش از ۱۵ درصد، می‌توانند قابلیت حل شدن را کمی افزایش دهند [۱۶-۱۷].

۵-٤-نرخ تراوایی بخار آب water vapor permeability

نفوذ پذیری نسبت به بخار آب (WVP) یکی از عوامل مهم در استفاده از فیلم‌های نشاسته‌ای برای بسته‌بندی مواد غذایی است، زیرا این فیلم‌ها به کاهش و

کنترل انتقال رطوبت بین غذا و محیط اطراف کمک می‌کنند. مقادیر پایین‌تر WVP برای بهبود ویژگی‌های سدگری فیلم‌های بسته‌بندی مطلوب است. افزودن نانوذرات نشاسته (SNPs) به طور قابل توجهی WVP فیلم‌های نانوکامپوزیتی نشاسته را در مقایسه با فیلم‌های نشاسته بدون SNP کاهش می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهند که افزودن SNPها ساختار فیلم را متراکم‌تر می‌کند و عبور مولکول‌های آب را دشوار می‌سازد. این اثر به دلیل ایجاد مسیرهای پیچ در پیچ توسط نانوذرات است که مولکول‌های آب را مجبور می‌کند از مسیری طولانی‌تر و پیچیده‌تر عبور کنند و به این ترتیب نفوذ آن‌ها از طریق فیلم کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت سطح به حجم در مقیاس نانومتری، در تحرک زنجیره‌های پلیمری تداخل ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، WVP فیلم‌های نانوکامپوزیتی با افزودن ۱۰ درصد نانوکریستال نشاسته کاساوا ۴۳ درصد کاهش یافت و با افزودن ۶ درصد نانوذرات نشاسته ساگو به ۵/۹۳ گرم میلی‌متر متر مربع در ساعت پاسکال رسید، در حالی که نرخ عبود بخار آب فیلم‌های نشاسته‌ای خالص ۱۲/۰۸ گرم میلی‌متر متر مربع در ساعت پاسکال بودند. با این حال، در غلظت‌های بالاتر، محدوده ۲۰ تا ۲۵ درصد WVP دوباره کمی افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل تجمع بیش از حد SNPها اتفاق می‌افتد که اثربخشی آن‌ها در جلوگیری از نفوذ مولکول‌های آب را کاهش می‌دهد. با افزایش مقدار SNPها در محدوده مشخص، فیلم‌های نانوکامپوزیتی ویژگی‌های سدگری بهتری از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی موثر می‌سازند [۱۶-۱۷].

همچنین در مطالعه‌ای دیگر با افزودن نانوذرات تارو به فیلم نشاستهٔ ذرت، نرخ تراوایی بخار آب و شفافیت کاهش یافت [۱۴].

۵-۵-ممانعت از عبور گازها

نفوذ پذیری کم اکسیژن یکی از ویژگی‌های مهم مواد بسته بندی مواد غذایی است زیرا اکسیژن بر کیفیت مواد غذایی به ویژه مواد غذایی حاوی لیپید تأثیر می گذارد. فیلم‌های نشاسته‌ای دارای خواص ممانعت کنندگی عالی در برابر اکسیژن هستند، بنابراین برای نگهداری مواد غذایی مناسب هستند [۲].

نرخ عبور اکسیژن (OTR) حالت پایداری است که در آن گاز اکسیژن از طریق فیلم تحت شرایط خاص رطوبت و دما نفوذ می کند. OTR فیلم های برپایه‌ی نشاسته را می توان با افزودن میکروذرات یا نانوذرات به طور قابل توجهی بهبود بخشید. در یک مطالعه فیلم نشاسته ذرت با نانوذرات نشاسته زنجیره شکسته شده (DSNPs)به روش امولسیون معکوس ساخته شد تا ویژگی‌های عملکردی آن بهبود یابد. میزان عبورپذیری اکسیژن (OTR) در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰درصد اندازه‌گیری شد. فیلم‌های نشاسته ذرت معمولی مقدار OTR برابر با ۳۹۴/۴۸ سانتی‌متر مکعب در مترمربع در روز داشتند، در حالی که فیلم‌های نانوکامپوزیتی OTR بسیار کمتری نشان دادند.

در مطالعه‌ای افزودن نانو ذرات نشاسته به فیلم نشاسته ترموپلاستیک نخود به میزان زیادی OTR را کاهش داد [۱۷].

۵-۶-ویژگی‌های حرارتی

ویژگی‌های حرارتی نانوکامپوزیت‌ها عامل مهمی در تعیین شرایط فرآوری مناسب است. در مطالعه‌ای دیگر اعلام شد که مکانیسم عمل SNPها به عنوان یک پرکننده در فیلم‌های نانو برای افزایش پایداری، شامل برهمکنش بین این نانو ذرات پرکننده و زمینه فیلم است که مانعی را تشکیل می‌دهد که می‌تواند انتقال گرما و انرژی را مهار کند [۵]. افزودن نانوذرات نشاسته به فیلم‌های نانوکامپوزتی نشاسته باعث افزایش دمای ذوب فیلم‌ها و کاهش آنتالپی ذوب می‌شود. این کاهش آنتالپی به تاثیر نانوذرات بر ساختار تبلور زنجیره‌های نشاسته نسبت داده می شود. تحقیقات نشان می‌دهد که ترکیب نانوذرات نشاسته تارو (نوعی گیاه ریشه‌ای) (۰/۵ تا تا ۱۵درصد) به دلیل برهمکنش ذکر شده، دمای آغاز و ذوب فیلم را افزایش می‌دهد. ماهیت کریستالی نانوذرات نشاسته به افزایش پایداری حرارتی کمک می‌کند. غلظت‌های بالاتر نانوذرات دمای پیک گرماگیر را افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده تبلور مجدد آمیلوز در طول تشکیل فیلم است [۱۷].

۵-۷-ویژگی‌های مکانیکی

ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های نانوکامپوزیتی بر پایهٔ نشاسته، از جمله استحکام، سفتی و قابلیت کشش، برای حفظ یکپارچگی ساختاری و محافظت از میوه‌ها و سبزیجات بسیار مهم است. این ویژگی‌ها تحت تأثیر عواملی مانند طول زنجیره پلیمری، آب گریزی، بار سطحی و میزان رطوبت است. در سطوح رطوبت کم (رطوبت نسبی ۰ درصد)، فیلم های برپایه‌ی نشاسته می‌توانند به استحکام کششی بالایی (تا ۲۰ مگاپاسکال) دست یابند، اما این میزان در شرایط رطوبت بالا به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (۱ مگاپاسکال). در مطالعه‌ای که با افزودن نوعی SNPهای اکسید شده به فیلم‌های نشاستهٔ ذرت انجام شد، استحکام کششی، مدول یانگ و ازدیاد طول در هنگام گسیختگی نسبت به فیلم‌های شاهد به طور قابل توجهی بالاتر بود. [۱۷].

به طور کلی در اکثر موارد با افزودن SNP مدول الاستیسیته و استحکام کششی افزایش می‌یابد که به کاهش درصد کشیدگی در بیوپلاستیک های تولید شده مربوط می‌شود. بهبود خواص مکانیکی لایه‌های نانوکامپوزیتی حاصل را می‌توان به ساختار و سفتی نانوذرات نسبت داد که حرکت زنجیره‌های نشاسته را محدود می کند [۵].

۵-۸-زیست تخریب پذیری

ترکیب نانو نشاسته از منابع گیاهی مختلف در فیلم‌های بسته‌بندی به عنوان اجزای تقویت‌کننده یا پرکننده‌های زمینه پلیمری به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. نشاسته به دلیل خواص مکانیکی مناسبی که در تولید بیوپلاستیک دارد، توانایی خوبی در ساخت فیلم‌های زیست تخریب پذیر دارد [۵].

نشاسته به سادگی با تخمیر میکروبی تجزیه می‌شود و هیدروژن و متان تولید می کند. عوامل موثر بر زیست تخریب پذیری فیلم‌های نشاسته شامل طبیعت میکروبی، رطوبت خاک، شرایط جوی، جذب آب و انتقال بخار آب است. مکانیسم زیست تخریب پذیری به دلیل فعالیت آنزیم‌ها و میکروب‌های زنده رخ می‌دهد. روش‌های دفن خاک به طور موثر برای نظارت بر میزان تجزیه پذیری زیستی این نوع فیلم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانوذرات نشاسته عمدتا به علت امکان انتشار زیاد آب و بزرگ شدن منجر به تجزیه پذیری بسیار بالاتری در این فیلم‌ها می‌شوند. نشاسته بومی به آسانی در آب حل نمی‌شود و برای مقابله با این مشکل، نشاسته از نظر شیمیایی اصلاح می شود [۱۷].

۶-نتیجه گیری

با توجه به قابلیت بالای نانوذرات نشاسته در بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری فیلم‌ها و پوشش‌های مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی، این مواد به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای پلیمرهای سنتی غیرقابل‌تجزیه شناخته شده‌اند. استفاده از روش‌های متنوع تولید، مانند نانو رسوب، هیدرولیز اسیدی و روش‌های آنزیمی، امکان کنترل ویژگی‌های ساختاری و عملکردی این ذرات را فراهم می‌آورد. این تنوع روش‌ها به محققان این امکان را می‌دهد که نانوذرات نشاسته را با ویژگی‌های متناسب با نیازهای خاص صنایع غذایی طراحی کنند.

علاوه بر این، کاربرد نانوذرات نشاسته در تولید فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر نه تنها به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه با حفظ خواص مکانیکی و سدگری مطلوب، پایداری و ماندگاری مواد غذایی را نیز تضمین می‌کند. با توجه به مقرون‌به‌صرفه بودن و سازگاری این مواد با محیط‌زیست، توسعه بیشتر فناوری‌های تولید و بررسی جامع‌تر اثرات آنها بر بسته‌بندی هوشمند می‌تواند زمینه‌ساز پیشرفت‌های نوآورانه در این حوزه باشد.

۷-منابع

1. Adeyeye SAO, Babu AS, Guruprasath N GN, Ganesh PS. Starch Nanocrystal and its Food Packaging Applications. Curr Res Nutr Food Sci. 2023 Apr 25;11(1):01-21.
2. Cui C, Ji N, Wang Y, Xiong L, Sun Q. Bioactive and intelligent starch-based films: A review. Trends in Food Science & Technology. 2021 Oct;116:854-69.
3. Hosseini SN, Pirsa S, Farzi J. Biodegradable nano composite film based on modified starch-albumin/MgO; antibacterial, antioxidant and structural properties. Polymer Testing. 2021 May;97:107182.
4. Hassan NA, Darwesh OM, Smuda SS, Altemimi AB, Hu A, Cacciola F, et al. Recent Trends in the Preparation of Nano-Starch Particles. Molecules. 2022 Aug 26;27(17):5497.
5. Marta H, Rizki DI, Mardawati E, Djali M, Mohammad M, Cahyana Y. Starch Nanoparticles: Preparation, Properties and Applications. Polymers. 2023 Feb 25;15(5):1167.
6. Campelo PH, Sant'Ana AS, Pedrosa Silva Clerici MT. Starch nanoparticles: production methods, structure, and properties for food applications. Current Opinion in Food Science. 2020 Jun;33:136-40.
7. Dularia C, Sinhmar A, Thory R, Pathera AK, Nain V. Development of starch nanoparticles based composite films from non-conventional source - Water chestnut (Trapa bispinosa). International Journal of Biological Macromolecules. 2019 Sep;136:1161-8.
8. Bajer D. Nano-starch for food applications obtained by hydrolysis and ultrasonication methods. Food Chemistry. 2023 Feb;402:134489.
9. Dukare AS, Arputharaj A, Bharimalla A, Saxena S, Vigneshwaran N. Nanostarch production by enzymatic hydrolysis of cereal and tuber starches. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2021 Dec;2:100121.
10. Apostolidis E, Mandala I. Modification of resistant starch nanoparticles using high-pressure homogenization treatment. Food Hydrocolloids. 2020 Jun;103:105677.
11. Chavan P, Sinhmar A, Thory R, Sharma S, Sukhija S, Singh GP, et al. Acid Hydrolyzed Pearl Millet Starch Nanoparticles: Synthesis and

Characterization. Starch Stärke. 2024 Nov;76(11-12)
12. Ahmad M, Gani A, Hassan I, Huang Q, Shabbir H. Production and characterization of starch nanoparticles by mild alkali hydrolysis and ultra-sonication process. Sci Rep. 2020 Feb 26;10.
13. Ashfaq A, Khursheed N, Fatima S, Anjum Z, Younis K. Application of nanotechnology in food packaging: Pros and Cons. Journal of Agriculture and Food Research. 2022 Mar;7:100270.
14. Primožič M, Knez Ž, Leitgeb M. (Bio)Nanotechnology in Food Science—Food Packaging. Nanomaterials. 2021 Jan 22;11(2):292.
15. Onyeaka H, Obileke K, Makaka G, Nwokolo N. Current Research and Applications of Starch-Based Biodegradable Films for Food Packaging. Polymers. 2022 Mar 11;14(6):1126.
16. Liu C, Jiang S, Zhang S, Xi T, Sun Q, Xiong L. Characterization of edible corn starch nanocomposite films: The effect of self-assembled starch nanoparticles. Starch Stärke. 2016 Apr;68(3-4):239-48.
17. Chavan P, Sinhmar A, Sharma S, Dufresne A, Thory R, Kaur M, et al. Nanocomposite Starch Films: A New Approach for Biodegradable Packaging Materials. Starch Stärke. 2022 May;74(5-6)