



6 FLHQWLILF -RXUQDO RI 3DFNDJ QJ 6 FLI  
9RO 1R :LQWHU6HULDO 1R



,661 - ( -6 -

1 H Z \$ F K L H Y H P H Q W V R I % L R G H J U D

□ ID □ ID □



3



*The use of petroleum-derived plastics, especially pentagonal plastics (polypropylene, polyethylene, polyvinyl chloride, polystyrene and polyethylene terephthalate), provides numerous and significant social benefits. For example, plastics are used to package food, water and beverages and contribute to the health and safety of people all around the world. In addition to food, most personal items, cosmetics and household items are packed in plastic containers. However, the proliferation of plastic contamination is a global concern. Reuse, Reduce and Recycle"offers a solution; although it is not enough to prevent the improper use of plastics. Bio-based plastics, like traditional fossil-based plastics, can be recycled or incinerated. The popularity of biodegradable plastics in agriculture and the food packaging industry is increasing. However, they occupy a relatively small portion of plastic use. Biodegradable polymers help industries achieve sustainable development, thereby strengthening the green economy, reducing greenhouse gases in the environment and valuing waste biomass. Biodegradable films are made of animal proteins (including myofibrillar proteins of fish, collagen, gelatin, etc.), plants (rice, wheat, corn, barley, sunflower etc.), legumes (locust beans, peas, etc.), and aquatic plants such as macrophytes.*



## دستاوردهای نوین پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر پروتئینی

ناصر صداقت<sup>۱\*</sup>، پروین بقری<sup>۲</sup>

۱- استادا، ۲- دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1401.13.52.4.9

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

### چکیده

استفاده از پلاستیک‌های مشتق شده از نفت به‌ویژه پلاستیک‌های پنج‌گانه (پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی‌وینیل کلراید، پلی‌استایرن و پلی‌اتیلن ترفتالات) مزایای اجتماعی متعدد و قابل توجهی را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، پلاستیک‌ها برای بسته‌بندی مواد غذایی، آب و نوشیدنی‌ها استفاده می‌شود و به سلامت و ایمنی مردم در سراسر جهان کمک می‌کند. علاوه بر غذا، بیشتر لوازم شخصی، لوازم آرایشی و بهداشتی و خانگی در ظروف پلاستیکی بسته‌بندی می‌شوند. ولی پیشرفت آلودگی پلاستیک یک نگرانی جهانی است، "استفاده مجدد، کاهش و بازیافت" راه‌حلی برای این موضوع ارائه می‌دهد. اگرچه برای جلوگیری از استفاده بی‌رویه پلاستیک کافی نیست. پلاستیک‌های بر پایه مواد زیستی مانند پلاستیک‌های سنتی بر پایه فسیل، می‌توانند بازیافت یا سوزانده شوند. مقبولیت پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر در کشاورزی و صنایع بسته‌بندی مواد غذایی در حال افزایش هستند. باین حال، آن‌ها بخش نسبتاً کوچکی را اشغال می‌کنند. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به صنایعی که به دستیابی به توسعه پایدار و در نتیجه تقویت اقتصاد سبز و کاهش گازهای گلخانه‌ای در محیط‌زیست و ارزش‌گذاری زیست‌توده زباله کمک می‌کند. فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر از پروتئین‌های حیوانی (شامل پروتئین میوفیبریلار ماهی، کلاژن، ژلاتین و غیره) و گیاهان (برنج، گندم، ذرت، جو و غیره)، حبوبات (لوبیای لوکاست، نخود و غیره)، (آفتابگردان) و گیاهان آبی مانند ماکروفیت‌ها ساخته می‌شوند.

**کلیدواژه‌ها:** بسته‌بندی، پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر، بسته‌های پروتئینی.

### ۱- مقدمه

مطرح‌شده است. پلاستیک‌ها به این دلیل محبوب هستند که هزینه‌های مالی کمتری بر انسان‌ها متحمل می‌کنند [۳]. پلاستیک به دو شکل ماکروپلاستیک‌ها (< ۵ میلی‌متر) و میکروپلاستیک‌ها (خاک را آلوده می‌کند. میکروپلاستیک‌ها، یعنی ذرات پلاستیک کمتر از ۵ میلی‌متر که از تخریب ماکروپلاستیک، ریزدانه‌ها و الیاف میکروپلاستیک تشکیل شده‌اند. میکروپلاستیک در خاک و آب وارد زنجیره غذایی با اثرات مضر سلامتی می‌شود [۱]. باین حال، مصرف‌کنندگان اکنون بیشتر از اثرات مضر پلاستیک‌ها بر محیط‌زیست آگاه هستند. بنابراین مواد پلیمری زیست‌تخریب‌پذیر یکی از مناسب‌ترین ابزارها برای حفظ محیط‌زیست هستند [۴]. از سال ۱۹۹۱ بسیاری از کشورها سیاست‌هایی را برای کاهش کیسه‌های پلاستیکی یک‌بارمصرف و برای کاهش ریزدانه‌های پلاستیکی اتخاذ کرده‌اند. پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر و کمپوست‌پذیر مزایای اجتماعی فوق‌الذکر را به دلیل، فقدان باقیمانده‌های مضر یا کود کمپوست باارزش فراهم می‌کند. پلی لاکتیک اسید<sup>۱</sup>، نشاسته، خمیر سلولز، پلی هیدروکسی آلکانوات<sup>۲</sup>

پایداری شیمیایی پلیمرهای سنتزی که یکی از اصلی‌ترین دلیل کاربردهای موفق آن‌ها است؛ باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی به دلیل حجم زیاد زباله‌های پلاستیکی سالانه در محیط‌زیست منتشر می‌شود. برآوردها در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که از مقدار کلی زباله‌های پلاستیکی تولیدشده بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۵ تنها ۹ درصد بازیافت شده است. در همان سال، حدود ۵۵ درصد از جهان زباله‌های پلاستیکی در محیط دور ریخته شد یا در محل دفن شد، ۲۵ درصد سوزانده شد و ۲۰ درصد بازیافت شد [۱].

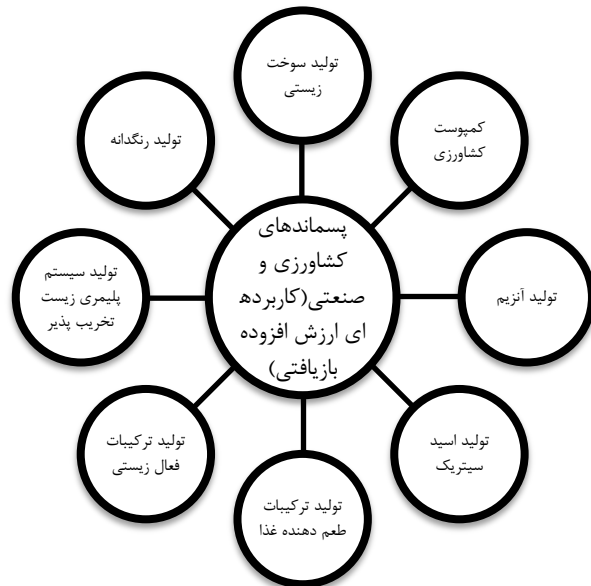
اگرچه مواد پلاستیکی، با آرایش‌های متعدد و هزینه‌های ساخت، از کیفیت بالایی برخوردار هستند، این موضوع بسیار نگران‌کننده است که بتوان مواد پلاستیکی را به‌طور مناسب در جامعه مدیریت کرد [۲]. درحالی‌که پلاستیک‌ها به دلیل استفاده طولانی‌مدت عملکردی ارزش زیادی پیدا کرده‌اند، اخیراً دیدگاه‌های زیادی در مورد خطرات زیست‌محیطی مرتبط با پلاستیک و بحران‌های انرژی

<sup>1</sup> Poly Lactic Acid (PLA)

<sup>2</sup> Poly Hydroxyl Alkanoate (PHA)

\* رایانامه نویسنده مسئول: sedaghat@um.ac.ir

برای کاهش آلودگی صنعتی و به حداقل رساندن زباله‌های آلی از طریق بازیافت اجرا شود. (شکل ۱) [۸].



شکل (۱): ضایعات کشاورزی و صنعتی: تصویری شماتیک از کاربردهای ارزش افزوده بازیافتی [۸].

### ۳- پلیمرهای زیست تخریب پذیر

پلاستیک‌های زیستی که از زباله‌های کشاورزی به دست می‌آیند به‌عنوان جایگزینی غیر آلاینده و پایدار برای همتایان غیرقابل تجزیه زیستی خود محبوب شده‌اند. پلاستیک‌های زیستی، یا منشأ بیولوژیکی دارند یا زیست تخریب پذیر هستند یا هر دو ویژگی را نشان می‌دهند. در این زمینه، آن‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: زیست تخریب پذیر و غیر زیست تخریب پذیر. همه پلاستیک‌های زیستی تجزیه پذیر نیستند، حتی اگر از منابع طبیعی تهیه شده باشد، زیست تخریب پذیری آن‌ها بر اساس مسیر و میزان تخریب تعیین می‌شود [۹].

پلاستیک‌های زیست تخریب پذیر از پلیمرهای زیستی مانند پلی لاکتیک اسید نشاسته، سلولز، پلی هیدروکسی آلکانوات و مشتقات آن‌ها ساخته شده‌اند. پلاستیک‌های بر پایه مواد زیستی مانند پلاستیک‌های سنتی بر پایه فسفیل، می‌توانند بازیافت یا سوزانده شوند. از طرف دیگر، می‌توان آن‌ها را از طریق فعالیت میکروبی با کمپوست کردن آن‌ها در مقیاس خانگی یا صنعتی تجزیه کرد.

ردپای کربن زیست توده کشاورزی مانند پوست موز، ساقه ذرت، ضایعات سبزیجات، تراشه‌های چوب، پوسته غلات و غیره را می‌توان با هدایت مجدد ضایعات به سمت ساخت پلاستیک‌های زیستی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد (شکل ۲) [۱۰].

مانند پلی هیدروکسی بوتیرات و پلی هیدروکسی اکتانوات، بیوپلیمرهای اصلی هستند که برای تولید اقلام بیوپلاستیک یک‌بار مصرف امروزی مانند کیسه، ظروف، نی، همزن قهوه، لیوان، گلدان باغبانی، سطل زباله، صفحات گردوغبار، بطری‌ها و اقلام بسته‌بندی استفاده می‌شوند. برآوردهای معتبر اخیر نشان می‌دهد که بسته‌بندی پلاستیکی ۴۰ درصد از کل پلاستیک مصرف هر ساله را تشکیل می‌دهد. اولین بیوپلاستیک بعد از ریلسان (پلی آمید ۱۱ یا نایلون ۱۱) در اوایل دهه ۱۹۵۰ تجاری شد و اوایل دهه ۱۹۹۰ به بازار رسید. در سال ۲۰۱۸، پلاستیک‌های زیستی نزدیک به یک درصد (۲،۱۱۲ میلیون تن) از حدود ۳۳۵ میلیون تن پلاستیک تولیدی در جهان را تشکیل می‌دهد [۱]. همچنین سیاست‌گذاران مختلف برنامه‌هایی را برای ارتقاء و بهبود پلاستیک‌های زیستی ایجاد کرده‌اند [۵].

پلاستیک زیست تخریب پذیر اگر رطوبت کافی، اکسیژن و تعداد مناسب میکروارگانیسم وجود داشته باشد، ممکن است در عرض ۲۰ تا ۴۵ روز به دی‌اکسید کربن و آب تجزیه می‌شود. در حالی که تجزیه پلاستیک‌های معمولی صد تا هزار سال طول می‌کشد [۶].

### ۲- بازیافت

فرآوری شیمیایی و مکانیکی دو رویکردی هستند که به‌طور گسترده برای بازیافت محصولات مبتنی بر پلاستیک استفاده می‌شود. فرآوری شیمیایی با انجام شیمی لیز با تعدادی از ترکیبات (آب، متانول، اتیلن گلیکول و غیره) انجام می‌شود که منجر به دپلیمریزاسیون پلاستیک می‌شود. فرآیند دپلیمریزاسیون را می‌توان با هیدرولیز، متانولیز، گلیکولیز یا آمینولیز انجام داد. دپلیمریزاسیون منجر به تولید واحدهای مونومر غیر یکسان قابل بازیافت می‌شود که می‌توانند برای ساخت پلاستیک‌های جدید پلیمریزه شوند. با این حال، جریان زباله از جایی که پلاستیک برای بازیافت جمع‌آوری می‌شود، مخلوط ناهمگنی از نرم‌کننده‌ها، تثبیت‌کننده‌ها، رنگ‌ها و سایر مواد افزودنی است که مانع از تولید مونومرهای با خلوص بالا می‌شود [۷].

وجود افزودنی‌ها و ناخالصی‌ها فرآیند بازیافت را پیچیده می‌کند و بر هزینه فرآوری و خواص محصول بازیافت شده تأثیر می‌گذارد. فرآوری مکانیکی پلاستیک یک فرآیند پیچیده است، با این حال به شیمی لیز که یک روش مقرون‌بصرفه است، ترجیح داده می‌شود. در حالی که فرآیند بازیافت بر کاستی‌های زیست محیطی محل دفن زباله و سوزاندن فائق می‌آید، مرتب‌سازی پلاستیک به هزینه بازیافت می‌افزاید و اکستروژن پلاستیکی بازیافت شده پس از آن استفاده محدودی دارد. فناوری پاک برای اطمینان از استفاده عاقلانه از منابع طبیعی برای کاهش تأثیر استفاده از آن‌ها بر تنوع زیستی می‌تواند

## ۵- پروتئین‌های گیاهی مورد استفاده برای توسعه مواد بسته‌بندی

### ۵-۱- پروتئین سویا

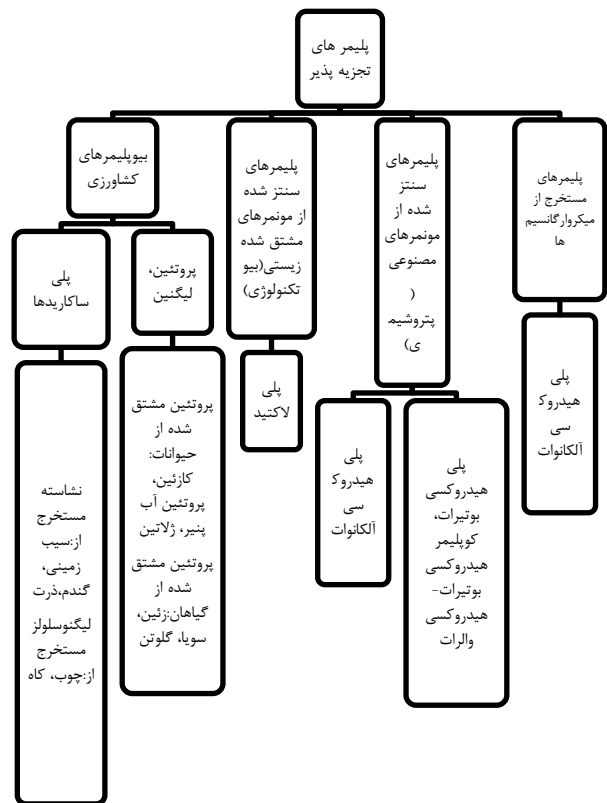
پروتئین‌های سویا از مخلوطی از آلبومین‌ها و گلوبولین‌ها تشکیل شده‌اند که ۹۰ درصد آن‌ها پروتئین‌های ذخیره‌ای با ساختار کروی هستند که عمدتاً از گلوبولین‌های S<sub>7</sub> (b-کانگلیسین) و S<sub>11</sub> (گلیسینین) تشکیل شده‌اند. امروزه تقاضا برای پروتئین دانه سویا به‌عنوان یک منبع غذایی به‌دلیل ارزش عملکردی و تغذیه‌ای آن و در دسترس بودن آن با هزینه اقتصادی رو به افزایش است. تجزیه و تحلیل بیوشیمیایی نشان می‌دهد که تقریباً ۳۸٪ پروتئین، ۳۰٪ کربوهیدرات، ۱۸٪ روغن و ۱۴٪ مواد معدنی در دانه سویا وجود دارد. کنسانتره‌های پروتئین سویا<sup>۱</sup> و ایزوله‌های پروتئین سویا<sup>۲</sup> کاربرد زیادی در صنایع بسته‌بندی دارند اسد و همکاران [۱۱] پلاستیک‌های بر پایه پروتئین سویا عمدتاً از طریق اکستروژن و همچنین قالب‌گیری فشرده‌سازی و قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند. فیلم‌های ساخته‌شده از پروتئین سویا ویژگی‌های خوبی را به‌عنوان مانع در برابر اکسیژن و همچنین در برابر اشعه ماوراءبنفش نشان می‌دهند، بنابراین می‌توان از آن‌ها در بسته‌بندی استفاده کرد. پلاستیک‌های پروتئین سویا برای تهیه فویل در کشاورزی مفید هستند، که پس از عدم نیاز به آن‌ها، نیازی به حذف آن‌ها از زمین‌های کشاورزی نیست؛ زیرا زیست‌تخریب‌پذیر هستند و موجب تأمین مواد مغذی برای خاک می‌شوند. پروتئین سویا را می‌توان به محصولات فوم با دانسیته‌های مختلف و همچنین به مواد عایق با ویژگی‌های حرارتی مختلف تبدیل کرد [۱۱].

### ۵-۲- گلوتن گندم

گلوتن گندم به‌دلیل ویژگی‌هایی مانند خواص مکانیکی خوب، ممانعت در برابر اکسیژن، تشکیل فیلم و تجدید پذیری، جایگزین جالبی برای مواد پلاستیکی سنتزی است. فیلم‌های گلوتن گندم معمولاً با ریخته‌گری محلول‌های پروتئین و با استفاده پرس حرارتی به دست می‌آیند [۱۲].

### ۵-۳- زئین ذرت

پروتئین زئین شامل گروهی از پروتئین‌های محلول در الکل (پرولامین‌ها) است. می‌توان آن را با محلول الکلی استخراج کرد و به‌صورت پودر دانه‌ای خشک کرد. زئین ذرت شیشه موم زنبورعسل است و می‌تواند نرم، انعطاف‌پذیر، مقاوم و کشسان باشد. زئین مزایای بالقوه‌ای را به‌عنوان ماده خام برای فیلم و پوشش برای کاربردهای



شکل (۲): سیستم طبقه‌بندی پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر بر اساس منشأ آن‌ها [۱۰].

## ۴- پلاستیک‌های بر پایه پروتئین

پروتئین‌ها را می‌توان به‌عنوان پلیمرهای طبیعی تعریف کرد که قادر به تشکیل ساختارهای آمورف سه‌بعدی هستند که عمدتاً توسط برهم‌کنش‌های غیر کووالانسی تثبیت می‌شوند. خواص عملکردی این مواد به‌شدت به ناهمگنی ساختاری، پایداری حرارتی و ماهیت هیدروفیل پروتئین‌ها بستگی دارد. تعدادی از پروتئین‌های با منشأ گیاهی برای تولید پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند، که شامل زئین ذرت، گلوتن گندم، پروتئین سویا و پروتئین بادام‌زمینی است. تحقیقات زیادی روی پلاستیک‌های بر پایه سویا در دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ انجام شد، زیرا نفت گران بود، در حالی که دانه‌های سویا به‌وفور در دسترس بود. پروتئین سویا بیشتر به‌عنوان پرکننده استفاده می‌شد. امروزه هنوز هم پروتئین سویا باهدف افزایش زیست‌تخریب‌پذیری پلاستیک‌ها استفاده می‌شود. در مقایسه با پلاستیک‌های کازئین، زئین و گلی سین، پروتئین سویا از نظر اقتصادی نیز قابلیت رقابت دارد [۱۱].

<sup>1</sup> Soy Protein Concentrates (SPCs)

<sup>2</sup> Soy Protein Isolates (SPIs)

فیلم استفاده کرد. ادغام نانوکامپوزیت در فیلم‌های بر پایه ژلاتین دامنه کاربرد وسیعی در زیست پزشکی دارد. فیلم‌ها و پوشش‌های ژلاتینی به دلیل ماهیت آب‌دوست، مانع ضعیفی در برابر رطوبت هستند. نفوذپذیری در مقابل بخار آب را می‌توان با افزودن اسانس‌ها و لیپیدها بهبود بخشید. استفاده از فناوری نانو و استفاده از نرم‌کننده مناسب در محلول‌های پوشش می‌تواند اکسیداسیون و رسیدگی میوه‌ها و سبزیجات را به تأخیر بیندازد [۱۳].

#### ۷- ماکروفیت‌ها به عنوان منبع پروتئین

ماکروفیت‌ها منبع خوبی از پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و لیپیدها هستند. محتوای پروتئین خام گونه‌های ماکروفیت آب شیرین از ۱۱٪ تا ۳۳٫۷۰٪ است. این پروتئین به راحتی قابل استخراج است که آن‌ها را به منبع پروتئینی کارآمد برای تولید مواد بسته‌بندی زیست تخریب پذیر تبدیل می‌کند. از آنجایی که ماکروفیت‌ها ارزان، در دسترس، زیست تخریب پذیر در طبیعت، غنی از پروتئین و مواد فعال زیستی هستند؛ یکی از بهترین گزینه‌ها برای ساخت بسته‌بندی‌های زیست تخریب پذیر جهت جایگزینی بسته‌بندی‌های پلاستیکی سنتزی هستند [۱۲].

#### ۸- موانع مهم موفقیت پلاستیک‌های پروتئینی

معایب ذاتی مواد بسته‌بندی بر پایه پروتئین از جمله خواص فیزیکی و شیمیایی ضعیف، استحکام مکانیکی ضعیف، خواص حرارتی و ممانعت کنندگی ضعیف هنوز چالش برانگیز است که تجاری سازی آن‌ها را در مقیاس وسیع محدود می‌کند و از طرفی پروتئین‌ها به دلیل داشتن گروه‌های آب‌دوست، مستعد فساد میکروبی هستند. مطالعاتی که باهدف افزایش خواص عملکردی آن‌ها با استفاده از چندین روش اصلاحی مانند تیمار آنزیمی، پخت حرارتی و غیره انجام شده است، نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه نکرده است، زیرا این روش‌ها دارای ویژگی خاصی هستند که مانع کاربرد انبوه آن‌ها در سطح تجاری می‌شود [۱۲].

#### ۹- مروری بر پژوهش‌های پیشین

چالرم‌تای و همکاران، به بررسی چرخه زندگی تولید بیوپلاستیک از پروتئین آب پنیر به دست آمده از بقایای لبنیات پرداختند. نتایج نشان داد که به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم پلاستیک آب پنیر تولید شده، ۲۹۰۰ مگا ژول انرژی مصرف شده، ۱۱۵/۳ کیلوگرم CO<sub>2</sub> منتشر شده، ۸۲/۵ کیلوگرم NOX منتشر شده و کمترین پتانسیل گرمایش جهانی، آلودگی آب شیرین و سمیت آبریان دریایی را نسبت به سایر پلاستیک‌های معمولی دارد [۱۴].

غذایی و دارویی ارائه می‌دهد. مواد بر پایه ژئین کم محلول در آب، سخت، آب‌گریز و مقاوم در برابر فساد میکروبی، اما شکننده هستند [۱۲].

#### ۵-۴- پروتئین آفتابگردان

دانه‌های آفتابگردان که در آب‌وهوای معتدل رشد می‌کنند منبع خوبی از پروتئین هستند. پلاستیک بر پایه پروتئین آفتابگردان را می‌توان از مواد باقی‌مانده پس از استخراج روغن آفتابگردان، از دو گروه پروتئینی اصلی گلوبولین S<sub>11</sub> و S<sub>2</sub> تهیه کرد. آلومین را از ایزوله پروتئین آفتابگردان<sup>۱</sup> می‌توان با استخراج قلبایی کیک روغن آفتابگردان به دست آورد [۱۲].

#### ۶- پروتئین‌های حیوانی مورد استفاده برای توسعه

##### مواد بسته‌بندی

##### ۱-۶- پروتئین آب پنیر

آب پنیر، یک پروتئین فعال شیر که معمولاً در فرمولاسیون ورزشی و برای کودکان استفاده می‌شود، علاوه بر این توانایی بالایی در تشکیل فیلم دارد. فیلم‌های پروتئین آب پنیر خواص مکانیکی و خواص ممانعت کنندگی گازی بسیار خوبی را در رطوبت نسبی کم ارائه می‌دهند اما با افزایش رطوبت نسبی ضعیف می‌شوند. علاوه بر این، پوشش‌های پروتئین آب پنیر نیز خواص ممانعت کننده عالی در برابر عطر و چربی‌ها نشان می‌دهد. پلاستیک‌های بر پایه پروتئین آب پنیر مقرون به صرفه و تجدیدپذیر هستند [۱۳].

##### ۲-۶- کازئین

کازئین ۸۰ درصد پروتئین شیر را تشکیل می‌دهد. کازئین شامل چهار زیر واحد اصلی  $\alpha_1S$ ،  $\alpha_2S$ ،  $\beta$  و  $k$ -کازئین با تعداد زیادی اسید آمینه است که باعث ایجاد رفتار امولسیون کنندگی خوب و همچنین پایداری مکانیکی و حرارتی کازئینات‌ها می‌شود. این پروتئین توانایی تشکیل فیلم خوبی دارد. در رطوبت نسبی کم، فیلم‌های انعطاف پذیر و شفاف با خواص ممانعت کنندگی خوب در برابر گازها و چربی دارد [۱۳].

##### ۳-۶- ژلاتین

ژلاتین یک پروتئین دناتوره شده است که از هیدرولیز حرارتی جزئی کلاژن به دست می‌آید. ژلاتین دارای قابلیت ژل کنندگی عالی است و به همین دلیل در صنایع غذایی، دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. می‌توان از آن به عنوان یک پایدارکننده عالی در تهیه محلول تشکیل

<sup>1</sup> Sunflower protein isolate (SFPI)

روژادو و همکاران، به ارزیابی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در زمینه ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی خواص بیوپلاستیک‌های بر پایه پروتئین سویا پرداختند. روش‌های مختلفی مثل افزایش دمای قالب (از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد)، استفاده از عملیات حرارتی (۴ و ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه) یا اولتراسوند (به مدت ۵ و ۴۵ دقیقه با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز) برای ارزیابی بهبود بیوپلاستیک‌های بر پایه پروتئین سویا مورد مطالعه قرار گرفتند. از این نظر، درجه اتصال عرضی، خواص مکانیکی، ظرفیت جذب آب و میکروگراف‌های الکترونی روبشی بیوپلاستیک‌های مختلف مقایسه شد. نتایج نشان داد که شرایط مناسب فرآیند و پس تیمارها می‌تواند برخی از ویژگی‌های پلاستیک‌های زیستی (مانند حداکثر تنش (۵ برابر) یا کرنش در هنگام شکست (حدود ۳ برابر)) را بهبود بخشد، اگرچه باعث ضعیف شدن سایر ویژگی‌ها (مانند ظرفیت جذب آب (حدود ۵۰ درصد)) می‌شود. به طور خاص، عملیات حرارتی خواص مکانیکی ساختارهای به دست آمده را بهبود بخشید، در حالی که تیمار اولتراسوند منجر به تشکیل ساختاری با منافذ کوچک‌تر شد [۱۵].

روزادو و همکاران، به ارزیابی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در زمینه ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی خواص بیوپلاستیک‌های بر پایه پروتئین سویا پرداختند. روش‌های مختلفی مثل افزایش دمای قالب (از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد)، استفاده از عملیات حرارتی (۴ و ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه) یا اولتراسوند (به مدت ۵ و ۴۵ دقیقه با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز) برای ارزیابی بهبود بیوپلاستیک‌های بر پایه پروتئین سویا مورد مطالعه قرار گرفتند. از این نظر، درجه اتصال عرضی، خواص مکانیکی، ظرفیت جذب آب و میکروگراف‌های الکترونی روبشی بیوپلاستیک‌های مختلف مقایسه شد. نتایج نشان داد که شرایط مناسب فرآیند و پس تیمارها می‌تواند برخی از ویژگی‌های پلاستیک‌های زیستی (مانند حداکثر تنش (۵ برابر) یا کرنش در هنگام شکست (حدود ۳ برابر)) را بهبود بخشد، اگرچه باعث ضعیف شدن سایر ویژگی‌ها (مانند ظرفیت جذب آب (حدود ۵۰ درصد)) می‌شود. به طور خاص، عملیات حرارتی خواص مکانیکی ساختارهای به دست آمده را بهبود بخشید، در حالی که تیمار اولتراسوند منجر به تشکیل ساختاری با منافذ کوچک‌تر شد [۱۵].

آگیلار و همکاران، بررسی تأثیر چهار پلی‌ال مختلف گلیسرول<sup>۱</sup>، اتیلن گلیکول<sup>۲</sup>، دی اتیلن گلیکول<sup>۳</sup>، تری اتیلن گلیکول<sup>۴</sup> به عنوان نرم‌کننده بر ویژگی‌های پلاستیک‌های زیستی بر پایه ایزوله پروتئین سویا<sup>۵</sup> پرداختند. انتخاب نرم‌کننده مناسب در فرمولاسیون مواد پلاستیکی یک گام اساسی برای دستیابی به خواص فیزیکی و ترمومکانیکی مناسب برای هر کاربرد نهایی است. همه پلاستیک‌های زیستی مورد مطالعه حاوی کسر جرمی یکسان (۴۵ درصد وزنی) نرم‌کننده بودند که در شرایط فرآیند مشابه (۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۶۰۰-۷۰۰ bar) قالب‌گیری شده بودند. مقادیر دمای انتقال شیشه‌ای<sup>۶</sup> برآورد شده از پیک تانژانت افت<sup>۷</sup>، برای پلاستیک‌های زیستی وابسته به وزن مولکولی نرم‌کننده بود که به ترتیب در حدود ۵-۲۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای پلاستیک‌های حاوی اتیلن گلیکول، دی اتیلن گلیکول، گلیسرول و تری اتیلن گلیکول بود. در نتیجه، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی متفاوتی در دمای اتاق داشتند. از این نظر، پلاستیک‌های زیستی حاوی تری اتیلن گلیکول کدر، شکننده و همچنین دارای ظرفیت جذب آب بالاتری بودند، در حالی که پلاستیک‌های زیستی حاوی اتیلن گلیکول انعطاف‌پذیرتر و شفاف‌تر بودند و هنگام غوطه‌ور شدن، آب بسیار کمتری را جذب می‌کردند. فقط گلیسرول و تری اتیلن گلیکول پس از ۹ روز نگهداری در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در بیوپلاستیک باقی ماندند، که نشان‌دهنده فرار بودن اتیلن گلیکول و دی اتیلن گلیکول است [۱۸].

روزادو و همکاران، به ارزیابی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در زمینه ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی خواص بیوپلاستیک‌های بر پایه پروتئین سویا پرداختند. روش‌های مختلفی مثل افزایش دمای قالب (از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد)، استفاده از عملیات حرارتی (۴ و ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه) یا اولتراسوند (به مدت ۵ و ۴۵ دقیقه با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز) برای ارزیابی بهبود بیوپلاستیک‌های بر پایه پروتئین سویا مورد مطالعه قرار گرفتند. از این نظر، درجه اتصال عرضی، خواص مکانیکی، ظرفیت جذب آب و میکروگراف‌های الکترونی روبشی بیوپلاستیک‌های مختلف مقایسه شد. نتایج نشان داد که شرایط مناسب فرآیند و پس تیمارها می‌تواند برخی از ویژگی‌های پلاستیک‌های زیستی (مانند حداکثر تنش (۵ برابر) یا کرنش در هنگام شکست (حدود ۳ برابر)) را بهبود بخشد، اگرچه باعث ضعیف شدن سایر ویژگی‌ها (مانند ظرفیت جذب آب (حدود ۵۰ درصد)) می‌شود. به طور خاص، عملیات حرارتی خواص مکانیکی ساختارهای به دست آمده را بهبود بخشید، در حالی که تیمار اولتراسوند منجر به تشکیل ساختاری با منافذ کوچک‌تر شد [۱۵].

آلوارز-کاستیلو و همکاران، تأثیر مخلوط کردن و فرمولاسیون بر خواص ترموفیزیکی پلاستیک‌های بر پایه گلوتن را بررسی کردند. پلاستیک‌های بر پایه گلوتن به دلیل خواص مکانیکی بیشتر در مقایسه با سایر مواد بر پایه پروتئین، جایگزین جالب‌تری برای پلاستیک‌های معمولی هستند. در این پژوهش، تأثیری که هم مخلوط کردن و هم وجود قندها بر خواص پلاستیک‌های بر پایه گلوتن اعمال می‌کند، از طریق سنجش‌های رئولوژیکی، آزمون‌های غوطه‌وری در آب و آزمون‌های میکروسکوپی مورد ارزیابی قرار گرفت. بنابراین، دو روش مختلف اختلاط (اکستروژن و اختلاط داخلی) برای محلول‌های گلوتن تهیه‌شده با آب و گلیسرول که در نهایت قالب‌گیری تزریقی شدند، انجام شد. اثر ترهالوز و ساکارز با محتوای ۲۰ درصد وزنی در فرمول مواد، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط‌های اکستروژن‌شده و همچنین پلاستیک‌های زیستی حاصل، مدول‌های ویسکوالاستیک بالاتری نسبت به مخلوط شده با استفاده از همزن داخلی نشان دادند. برای هر دو روش اختلاط، پلاستیک‌های زیستی رفتار ترموپلاستیک بسیار واضح‌تری را در مقایسه با مخلوط‌ها نشان دادند. افزودن قندها در فرمولاسیون موجب کاهش خواص ویسکوالاستیک، افزایش ظرفیت جذب آب و تخلخل پلاستیک‌ها شد [۱۶].

یامادا و همکاران، به بررسی تهیه بیوپلاستیک با استفاده از پروتئین سویا پرداختند. سویا، یکی از فراوان‌ترین گیاهان، در سراسر جهان است؛ دانه سویا در سطح جهان به عنوان محصول برای به دست آوردن روغن استفاده می‌شود. سویای بدون چربی حاوی مقدار زیادی پروتئین است. بخشی از سویای بدون چربی برای غذای مصرفی انسان و خوراک دام استفاده می‌شود، اما بیشتر آن به عنوان

<sup>1</sup> Formaldehyde(HCHO)

<sup>2</sup> Glycerol (GLY)

<sup>3</sup> Ethylene glycol (EG)

<sup>4</sup> Diethylene glycol(DEG)

<sup>5</sup> Triethylene glycol(TEG)

<sup>6</sup> Soy protein isolate(SPI)

<sup>7</sup> Glass transition temperature(Tg)

<sup>8</sup> tan  $\delta$

- pollution bulletin, vol. 160, p. 111518, 2020.
- [3] H. Saygin, and A. Baysal, "Similarities and discrepancies between bio-based and conventional submicron-sized plastics: in relation to clinically important bacteria," *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 105, no. 1, pp. 26-35, 2020.
- [4] M. F. Chek, S. Y. Kim, T. Mori, H. T. Tan, K. Sudesh, and T. Hakoshima, "Asymmetric open-closed dimer mechanism of polyhydroxyalkanoate synthase PhaC," *Isience*, vol. 23, no. 5, p.101084, 2020.
- [5] Z. S. Mazhandu, E. Muzenda, T. A. Mamvura, and M. Belaid, "Integrated and consolidated review of plastic waste management and bio-based biodegradable plastics: challenges and opportunities," *Sustainability*, vol. 12, no. 20, p. 8360, 2020.
- [6] T. D. Moshood, G. Nawanir, F. Mahmud, F. Mohamad, M. H. Ahmad, and A. Abdul Ghani, "Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution?," *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, p.100273, 2022.
- [7] G. W Coates and Y. D. Getzler, "Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy," *Nature Reviews Materials*, vol. 5, no. 7, pp. 501-516, 2020.
- [8] P. Rai, S. Mehrotra, S. Priya, E. Gnansounou, and S. K. Sharma, "Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers," *Bioresource technology*, vol. 325, p. 124739, 2021.
- [9] T. Narancic, F. Cerrone, N. Beagan, and K. E. O'Connor, "Recent advances in bioplastics: application and biodegradation," *Polymers*, vol. 12, no. 4, p. 920, 2020.
- [10] L. Palanikumar, S. Al-Hosani, M. Kalmouni, V. P. Nguyen, L. Ali, R. Pasricha, and M. Magzoub, "pH-responsive high stability polymeric nanoparticles for targeted delivery of anticancer therapeutics," *Communications biology*, vol. 3, no. 1, pp. 1-17, 2020.
- [11] M. R. Havstad, "Biodegradable plastics," In *Plastic waste and recycling*, Academic Press, pp. 97-129, 2020.
- [12] I. Assad, S. U. Bhat, A. Gani, and A. Shah, "Protein based packaging of plant origin: Fabrication, properties, recent advances and future perspectives," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 164, pp. 707-716, 2020.
- [13] U. Amin, M. U. Khan, Y. Majeed, M. Rebezov, M. Khayrullin, E. Bobkova, M. A. Shariati, I. M. Chung, and M. Thiruvengadam, "Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 183, pp. 2184-2198, 2021.
- [14] B. Chalermthai, A. Giwa, J. E. Schmidt, and H. Taher, "Life cycle assessment of bioplastic production from whey protein obtained from dairy residues," *Bioresource Technology Reports*, vol. 15, p. 100695, 2021.

روزودا و همکاران، به ارزیابی اختلاط یک عملیات حرارتی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در فرآیند بیوپلاستیک بر پایه ایزوله پروتئین سویا و ایزوله پروتئین نخود پرداختند. دو دمای مختلف قالب (۷۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان قرار گرفتن در معرض مختلف عملیات حرارتی (۴، ۰ و ۲۴ ساعت) برای ارزیابی تأثیر آن‌ها در خواص بیوپلاستیک‌ها و انتخاب بهینه‌ترین روش فرآیند مورد مطالعه قرار گرفت. خواص مکانیکی و ظرفیت جذب آب پلاستیک تولید از هر پروتئین مورد ارزیابی قرار گرفت. پلاستیک‌های زیستی ایزوله پروتئین نخود که در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد فرآیند شده‌اند، خواص مکانیکی خوبی دارند و ظرفیت جذب آب پایینی دارند؛ بنابراین می‌توانند در مواردی که خواص مکانیکی و نفوذپذیری بالا مورد نظر است، مانند بسته‌بندی مواد غذایی کاربرد داشته باشند. از طرف دیگر، دمای قالب فرآیند ۷۰ درجه سانتی‌گراد و عملیات حرارتی ۲۴ ساعت در بیوپلاستیک‌های ایزوله پروتئین سویا امکان دستیابی به خواص مکانیکی مناسب و ویژگی‌های فوق جاذب را فراهم می‌کند و در مواردی که برخی خواص مکانیکی و خواص جاذب خوبی مورد نیاز است، مثل کاربردهای بهداشتی عملکرد خوبی دارد [۱۹].

## ۱۰- نتیجه‌گیری

پلاستیک‌های سنتزی ارزان، بادوام و وزن سبک، مواد اصلی بسته‌بندی در سراسر جهان هستند و تولید زباله‌های پلاستیکی روزبه‌روز در حال افزایش است، که منجر به مشکل مدیریت زباله می‌شود که ۵۰ درصد (وزنی) کل زباله‌های شهری را تشکیل می‌دهد. اثرات مضر پلاستیک بر روی اکوسیستم‌های خشکی و آبی به دلیل روش‌های نایمن دفع زباله در حال افزایش است. مواد بسته‌بندی بر پایه پلیمرهای طبیعی به دلیل تجدید پذیری و زیست‌تخریب‌پذیری می‌توانند اثرات مضر بر محیط‌زیست را در پاسخ به چالش‌های رو به رشد تولید، انباشت و مدیریت زباله‌های پلاستیکی بر پایه نفت را کاهش دهند. پلاستیک‌های بر پایه پروتئین دارای ویژگی ممانعت‌کنندگی در برابر گازها هستند و در نتیجه می‌تواند جایگزین پلاستیک‌های معمولی در بسته‌بندی مواد غذایی شود. باین‌وجود، باید بر مشکلات آن‌ها مثل هزینه بالا، شکنندگی، فرآیندپذیری ضعیف و خواص مکانیکی پایین غلبه کرد.

## ۱۱- مراجع

- [1] R. Ciriminna and M. Pagliaro, "Biodegradable and compostable plastics: A critical perspective on the dawn of their global adoption," *Chemistry Open*, vol. 9, no. 1, pp. 8-13, 2020.
- [2] J. E. Weinstein, J. L. Dekle, R. R. Leads, and R. A. Hunter, "Degradation of bio-based and biodegradable plastics in a salt marsh habitat: Another potential source of microplastics in coastal waters," *Marine*

- [18] J. M. Aguilar, C. Bengoechea, E. Perez, and A. Guerrero, "Effect of different polyols as plasticizers in soy based bioplastics," *Industrial Crops and Products*, vol. 153, p. 112522, 2020.
- [19] M. Jiménez-Rosado, J. F. Rubio-Valle, V. Perez-Puyana, A. Guerrero, and A. Romero, "Use of heat treatment for the development of protein-based bioplastics," *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 18, p. 100341, 2020.
- [15] M. Jiménez-Rosado, E. Bouroudian, V. Perez-Puyana, A. Guerrero, and A. Romero, "Evaluation of different strengthening methods in the mechanical and functional properties of soy protein-based bioplastics," *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, p. 121517, 2020.
- [16] E. Álvarez-Castillo, M. Ramos, C. Bengoechea, I. Martínez, and A. Romero, "Effect of blend mixing and formulation on thermophysical properties of gluten-based plastics," *Journal of Cereal Science*, vol. 96, pp. 103090, 2020.
- [17] M. Yamada, S. Morimitsu, E. Hosono, and T. Yamada, "Preparation of bioplastic using soy protein," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 149, pp. 1077-1083, 2020.