

علمی - مروری

مروری بر بسته بندی پلاستیک های زیست تخریب پذیر سنتزی

آسیه قیافه شیرزادی<sup>۱</sup>، ناصر صداقت<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران،

۲- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷)

چکیده

سالاهاست که پلاستیک های معمولی برای کاربردهای بسته بندی در بخش های مختلف تولید و استفاده می شوند. با افزایش صنایع غذایی، تقاضا برای بسته بندی مواد غذایی نیز افزایش یافته است. با این حال، پلاستیک های ساخته شده از نفت تجزیه ناپذیر است و مشکلات زیست محیطی شدیدی را برای محیط زیست ایجاد کرده است. پلیمرهای زیستی یا زیست تخریب پذیر به عنوان یک رویکرد جایگزین برای بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله بسته بندی مواد غذایی و همچنین کنترل خطرات ناشی از پلاستیک غیرقابل تجزیه است. با توجه به نوع ماده ی اولیه، آن ها به عنوان پلیمرهای استخراج شده از ترکیبات زیست توده، سنتز شده از مونومرها و تولید شده از میکروارگانیسم ها طبقه بندی می شوند. کیفیت بیوپلیمرها به خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی بستگی دارد. بررسی حاضر مروری بر ویژگی های پلیمرهای زیستی مختلف و ترکیبات آن ها، مقایسه ی خواص بین پلیمرهای زیست تخریب پذیر و زیست پلیمری است و همچنین به پژوهش های اخیر و روش های نوآورانه برای استفاده از این نوع پلاستیک ها جهت بسته بندی مواد غذایی و مسمومیت پلاستیک های زیست توده اشاره شده است که در نتیجه می توان به این موارد اشاره کرد که پلیمرهای زیست تخریب پذیر به کاهش اثرات زیست محیطی پلاستیک ها کمک می کند و همچنین به دلیل استفاده از ضایعات کشاورزی به عنوان مواد اولیه برای ساخت این گونه بسته بندی، فرصت بسیار خوبی به جهت افزایش ارزش افزوده وجود دارد.

کلیدواژه ها: پلاستیک سنتزی، زیست تخریب پذیر، پلیمر، ویژگی ها، روش تولید پلاستیک های زیستی

۱- مقدمه

می کند. افزایش مشکلات برای دفع زباله و اثرات مضر بر محیط زیست و سلامت عمومی ناشی از تجزیه ناپذیری بسیاری از پلیمرهای مصنوعی، نگرانی ها را در سراسر جهان برای یافتن ماده ای جایگزین سازگار با محیط زیست افزایش داده است [2]. پلیمرهای زیست تخریب پذیر به عنوان یک رویکرد جایگزین برای بسیاری از کاربردهای صنعتی برای کنترل خطر ناشی از پلاستیک غیرقابل تجزیه ظاهر شدند. طبق گفته ی انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM)<sup>۱</sup>، پلاستیک زیست تخریب پذیر پلاستیکی است که به دلیل عملکرد میکروارگانیسم های طبیعی مانند باکتری ها، قارچ ها و جلبک ها تجزیه می شود [3]. آن ها از منابع تجدیدپذیر تولید می شوند و دارای خواص مشابهی چون استحکام کششی، خواص حرارتی، ازدیاد طول در هنگام شکست، سرعت انتقال بخار آب و سرعت انتقال اکسیژن با پلاستیک های معمولی مانند PET<sup>۲</sup> (پلی اتیلن ترفتالات)، PP (پلی پروپیلن)<sup>۳</sup>، PE (پلی اتیلن)<sup>۴</sup> و غیره هستند. آب، دی اکسید کربن، ترکیبات معدنی یا زیست توده محصولات عمده ای هستند که از تجزیه پلاستیک های زیست تخریب پذیر تولید می شوند. هیچ انباشتی

در زندگی امروزی، پلیمرها بخشی جدایی ناپذیر از زندگی روزمره را تشکیل می دهند. تولید جهانی پلاستیک ها (ترموپلاستیک ها، ترموست ها، چسب ها، پوشش ها و الیاف PP) در سال ۲۰۱۷ تقریباً ۳۴۸ میلیون تن بود و در سال ۲۰۱۸ به ۳۵۹ میلیون تن رسید. تولیدکنندگان عمده عبارت است از: آسیا (۵۱٪)، چین (۳۰٪)، اروپا (۱۷٪)، خاورمیانه و آفریقا [1] (۷٪). تقریباً ۹۵ تا ۹۹ درصد مواد پلاستیکی از منابع تجدید ناپذیر (پلاستیک های مصنوعی) از طریق صنایع پتروشیمی ساخته می شود. محصولات پلاستیکی مصنوعی به طور گسترده در زمینه های بسته بندی لوازم پزشکی، مصالح ساختمانی و مواد غذایی و غیره استفاده می شوند، اما پلاستیک مصنوعی نمی تواند در طبیعت تجزیه شود؛ بنابراین در نهایت منجر به افزایش ضایعات می شود. زباله مشکلات زیست محیطی و بهداشتی شدیدی ایجاد می کند. مقدار زیادی زباله ی پلاستیکی به اقیانوس ها و رودخانه ها ریخته می شود که به آبریان آسیب می رساند. سوزاندن منجر به انتشار گازهای مضر (دی اکسید کربن، مونو کسید کربن، کلر، فوران ها، آمین ها، دیوکسین و غیره) می شود که کیفیت هوا را کاهش و تهدید گرمایش جهانی را افزایش می دهد و نگرانی بهداشتی ایجاد

<sup>1</sup> American Society for Testing and Materials

<sup>2</sup> Polyethylene terephthalate

<sup>3</sup> Polypropylene

<sup>4</sup> Polyethylene

بازسازی شده<sup>۱۶</sup>، کربوکسی‌متیل سلولوز<sup>۱۷</sup>، محصولات لیگنوسلولوزی<sup>۱۸</sup>، کیتوزان<sup>۱۹</sup> و غیره را تولید کند. پلیمرهای تولیدشده از طریق سنتز شیمیایی با استفاده از مونومرهای زیستی تجدیدپذیر، مانند پلی‌لاکتیک اسید (PLA)<sup>۲۰</sup>، یک پلی‌استر زیستی پلیمریزه‌شده از مونومرهای اسیدلاکتیک از طریق تخمیر مواد اولیه کربوهیدرات تولید شده است و پلیمرهای تولیدشده از طریق میکروارگانیسم‌ها یا باکتری‌های اصلاح‌شده ژنتیکی مانند پلی‌هیدروکسی آلکونوات‌ها (PHA)<sup>۲۱</sup> مانند پلی‌هیدروکسی بوتیرات (PHB)<sup>۲۲</sup> و پلی‌هیدروکسی والرات (PHV)<sup>۲۳</sup> و سلولز باکتریایی [۷].

هدف این مقاله ارائه‌ی اطلاعات حیاتی در مورد پلیمرهای زیستی و پلاستیک‌های سنتزی زیست‌تخریب‌پذیر، به‌عنوان نقش آن‌ها در مواد بسته‌بندی است که یک نوآوری کلیدی است و می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی آلودگی پلاستیک کمک کند.

## ۲- آمار تولید

در سال ۲۰۱۹، بازار بسته‌بندی‌های پلاستیکی زیست‌تخریب‌پذیر ۴٫۶۵ میلیارد دلار ارزش داشت و تا پایان سال ۲۰۲۵، انتظار می‌رود که با رشد ۱۷٫۰۴ درصدی به ارزش بازار تا ۱۲٫۰۶ میلیون دلار برسد. این افزایش به دلیل افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و ابتکارات مختلف دولت برای کاهش زباله‌های پلاستیکی است. تولید جهانی زیست‌پلاستیک در سال ۲۰۱۹، ۲٫۱۱ میلیون تن بوده است و پیش‌بینی می‌شود تا پایان سال ۲۰۲۴ تولید به ۲٫۴۳ میلیون تن افزایش یابد. پلاستیک‌های غیرقابل تجزیه‌ی زیستی که از پلی‌اتیلن و پلی‌آمیدها تشکیل شده‌اند، روی‌هم‌رفته بیش از ۴۴ درصد از تولید جهانی پلاستیک‌های زیستی را تشکیل می‌دهند. پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر شامل PLA، PHA، ترکیبات نشاسته، PBAT و غیره بیش از ۵۵٫۵ درصد از تولید جهانی پلاستیک‌های زیستی را تشکیل می‌دهند [۸]. در تولید پلاستیک‌های زیستی، سهم عمده‌ی آسیا (۴۵٪)، اروپا (۲۵٪)، آمریکا شمالی (۱۸٪) و آمریکای جنوبی (۱۲٪) است. پلاستیک‌های زیستی در بخش‌های مختلفی مانند بسته‌بندی، لوازم الکترونیکی مصرفی، خودروسازی، ساختمان/ساخت‌وساز، کشاورزی/باغبانی، پوشش‌ها، بسته‌بندی سفت‌وسخت، بسته‌بندی انعطاف‌پذیر و بخش‌های مختلف دیگر استفاده می‌شود. بسته‌بندی بزرگ‌ترین زمینه‌ی کاربرد بیش از ۵۳٪

زباله‌ای که برای محیط زیست مضر باشد وجود ندارد [2]. کاربرد اصلی پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر در بسته‌بندی مواد غذایی و بخش‌های کشاورزی است. بسته‌بندی بخشی جدایی‌ناپذیر از تولید، ذخیره‌سازی، توزیع، نگهداری است [4]. در سال‌های اخیر، پلاستیک‌های با منشأ زیستی جایگزین پلاستیک‌های با منشأ نفتی شده است. تولید پلاستیک‌های زیستی به ۶۵ درصد انرژی کمتری نسبت به پلاستیک‌های معمولی نیاز دارد و همچنین به تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند [۵].

بر اساس سازمان زیست‌پلاستیک اروپا، چیزهایی به‌عنوان مواد پلاستیکی تعریف می‌شوند که یا پایه‌ی زیستی (قسمتی یا کامل) یا زیست‌تخریب‌پذیر هستند یا هر دو ویژگی را دارند. «پایه‌ی زیستی» به این معنی است که ماده یا محصول از زیست‌توده مشتق شده است و «زیست‌تخریب‌پذیر» به این معنی است که می‌تواند از طریق موجودات زنده موجود در جهان به مواد پایه مانند آب، دی‌اکسیدکربن، متان، عناصر اساسی و زیست‌توده تجزیه شود. [۶]؛ بنابراین، پلاستیک‌های زیستی را می‌توان به سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: (۱) پلاستیک‌های زیست‌پایه اما غیرقابل تجزیه‌ی زیست‌تخریب‌پذیر مانند پلی‌اتیلن زیستی (Bio-PE)<sup>۱</sup>، پلی‌امید زیستی (Bio-PA)<sup>۲</sup>، بیو-پلی‌اتیلن ترفتالات (Bio-PET)<sup>۳</sup>، بیو-پلی‌تری‌متیلن ترفتالات (Bio-PTT)<sup>۴</sup>، بیوپلی‌یورتان‌ها (Bio-PU)<sup>۵</sup>، بیوپلی‌پروپیلن (Bio-PP)<sup>۶</sup>. (۲) پلاستیک‌هایی که زیست‌تخریب‌پذیر و بر اساس منابع فسیلی هستند، مانند پلی (بوتیلن آدیپات-کو-ترفتالات) (PBAT)<sup>۷</sup>، پلی (بوتیلن سوکسینات-کو-بوتیلن آدیپات) (PBSA)<sup>۸</sup>، پلی وینیل الکل (PVA)<sup>۹</sup>، اسید پلی‌گلیکولیک (PGA)<sup>۱۰</sup>، پلی‌کاپرولاکتون (PCL)<sup>۱۱</sup>؛ و (۳) پلاستیک‌هایی که هم‌پایه‌ی زیستی و هم زیست‌تخریب‌پذیر هستند. این گروه آخر عبارت است از: پلیمرهایی که مستقیماً از زیست‌توده استخراج می‌شوند؛ مانند پلی‌ساکاریدها (مانند نشاسته، سلولز، کیتین و غیره) و پروتئین‌ها (به‌عنوان مثال، کلاژن، ژلاتین، کازئین، آب پنیر، پروتئین سویا، ذرت، گلوتن گندم و غیره) که بیشتر می‌تواند با مواد باارزش زیستی مانند استات سلولز<sup>۱۲</sup>، استات سلولز بوتیرات<sup>۱۳</sup>، سلولز استات پروپیونات<sup>۱۴</sup>، نیترات سلولز<sup>۱۵</sup>، سلولز

<sup>1</sup> Bio-polyethylene

<sup>2</sup> Bio-polyamide

<sup>3</sup> Bio-polyethylene terephthalate

<sup>4</sup> Bio-polytrimethylene terephthalate

<sup>5</sup> Biopolyurethanes

<sup>6</sup> Biopolypropylene

<sup>7</sup> Butylene adipate-co-terephthalate

<sup>8</sup> Butylene succinate-co-butylene adipate

<sup>9</sup> Polyvinyl alcohol

<sup>10</sup> Polyglycolic acid

<sup>11</sup> Polycaprolactone

<sup>12</sup> Cellulose acetate

<sup>13</sup> Cellulose acetate butyrate

<sup>14</sup> Cellulose acetate propionate

<sup>15</sup> Cellulose nitrate

<sup>16</sup> Regenerated cellulose

<sup>17</sup> Carboxymethyl cellulose

<sup>18</sup> Lignocellulosic products

<sup>19</sup> Chitosan

<sup>20</sup> Polylactic acid

<sup>21</sup> Polyhydroxyalkanoates

<sup>22</sup> Polyhydroxybutyrate

<sup>23</sup> Polyhydroxyvalerate

مواد غذایی و غیرخوراکی، سینی‌های تولیدی و کیسه‌های پلاستیکی استفاده می‌شود. LDPE برای مالچ‌پاشی مزارع کشاورزی و ساخت خانه‌های چندگانه استفاده می‌شود. همچنین برای پوشش روی کاغذ، منسوجات و سایر پلاستیک‌ها استفاده می‌شود [۱۰]. HDPE یک ترموپلاستیک پلی‌اتیلن است که از طریق فرآیند کاتالیزوری تولید می‌شود و دارای انشعاب کمی است. نیروهای بین‌مولکولی قوی‌تر و استحکام کششی بیشتری نسبت به LDPE دارد. چگالی بالاتر به دلیل کاهش طول پیوند و بسته‌بندی فشرده، پایداری بیشتری را فراهم می‌کند. به دلیل سختی، کدورت و دوام آن در دماهای بالاتر (تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد)، به طور گسترده در کاربردهای صنعتی و روزمره مانند تولید استفاده می‌شود. کیسه‌های حمل، بطری‌های مواد شوینده، ظروف زباله، لوله‌های آب و غیره... علاوه بر این، صدها گونه‌ی مختلف از اکوسیستم‌های مختلف به دلیل بلع این زباله‌ها در روده‌ی ماهی، پرندگان و پستانداران دریایی در آستانه‌ی انقراض هستند. فن‌آوری‌های فیزیکی‌شیمیایی شامل عملیات حرارتی و اشعه‌ی فرابنفش (UV) یا ترکیبی از هر دو است که باعث کاهش اندازه‌ی زنجیره‌ی پلیمر و تشکیل گروه‌های اکسیدشده مانند کربوکسیل، کربونیل و هیدروکسیل در سطح پلیمر می‌شود. این تیمارها بلورینگی و مورفولوژی سطح پلیمر اصلی را اصلاح می‌کند و تجزیه‌ی زیستی پلیمر را تسهیل می‌کند [۹]. اکسیداسیون پلی‌اتیلن با اسید نیتریک باعث تکه تکه شدن لایه‌های پلی‌اتیلن و به دنبال آن تخریب میکروبی می‌شود. تجزیه‌ی زیستی پلی‌اتیلن مقاوم از طریق بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، مکانیسم تجزیه‌ی زیستی پیچیده PE هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. پیشنهاد می‌شود که عوامل غیرزیستی و زیستی مختلف نقش حیاتی در تجزیه‌ی زیستی PE در محیط دارند [۱۱]. مطالعات تجزیه‌ی زیستی یا با استفاده از کشت‌های خالص که قادر به تجزیه‌ی پلی‌اتیلن هستند یا با استفاده از جوامع میکروبی پیچیده از زیستگاه‌های مختلف زمینی (خاک از محل‌های دفن زباله، کمپوست‌سازی) و زیستگاه‌های دریایی انجام شده است. علاوه بر این، تجزیه‌ی بیولوژیکی باکتریایی PE بیش از ۲۰ جنس باکتری نشان داده شده است که انواع مختلف PE را تخریب می‌کنند. آن‌ها شامل گونه‌های گرم‌منفی و گرم‌مثبت مختلف متعلق به جنس‌های سودوموناس<sup>۷</sup>، رالستونیا<sup>۸</sup>، کلبسیلا<sup>۹</sup>، استافیلوکوکوس<sup>۱۰</sup>، استرپتوکوکوس<sup>۱۱</sup>، باسیلوس<sup>۱۲</sup> و غیره هستند. اکثر این سویه‌های باکتریایی توانایی تخریب سطح و/یا تشکیل یک بیوفیلم روی پلی‌اتیلن را دارند. گونه‌های سودوموناس دارای توانایی منحصربه‌فردی برای تجزیه و متابولیسم کردن پلیمرها با فعالیت‌های

(۱،۱۴ میلیون تن) از کل پلاستیک‌های زیستی تولیدشده در سال ۲۰۱۹ است. بسته‌بندی مواد غذایی زیست‌تخریب‌پذیر اولین محصول بیوپلاستیک تجاری شده با موفقیت بود که به عنوان صنعتی قابل کمپوست<sup>۱</sup> شدن گواهی شد. از آن زمان، تقاضا برای پلاستیک‌های زیستی به عنوان بسته‌بندی مواد غذایی افزایش چشمگیری داشته است. بسته‌بندی انعطاف‌پذیر عمدتاً از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر استفاده می‌کند و بسته‌بندی سفت و سخت عمدتاً به بسته‌بندی غیرقابل تجزیه کمک می‌کند. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر نیز برای ذخیره‌سازی بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده برای میوه‌ها و سبزیجات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

### ۳- پلاستیک‌های زیست‌پایه سنتزی

#### ۳-۱- Bio-PE

پلی‌اتیلن ماده‌ای بسیار مقاوم و بی‌اثر است، بنابراین تجزیه‌ی آن در محیط حتی پس از چندین سال دفن در محل دفن زباله بسیار دشوار است. یک ورق پلی‌اتیلن زمانی که در خاک مرطوب به مدت ۱۲ تا ۳۲ سال نگهداری می‌شود، تنها تخریب جزئی و کاهش وزن ناچیز را نشان داد. مقاومت پلی‌اتیلن به دلیل نامحلول بودن آن در آب، آب‌گریزی به دلیل وجود ستون فقرات خطی اتم‌های کربن، درجه‌ی بلورینگی و وزن مولکولی بالای آن است. پلی‌اتیلن مانند پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE)<sup>۲</sup> و پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)<sup>۳</sup> برای مطالعات تجزیه‌ی زیستی استفاده شده است. LDPE با پلیمریزاسیون فشار بالا اتیلن تهیه شد. وجود زنجیره‌های منشعب باعث چگالی کم LDPE می‌شود. از نظر شیمیایی، LDPE در دمای اتاق بی‌اثر است، با این حال، می‌تواند به تدریج از طریق عوامل اکسیدکننده قوی و برخی حلال‌ها مورد حمله قرار گیرد و منجر به نرم شدن یا تورم شود. برای مدت کوتاهی تا دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد دست‌نخورده است و می‌تواند برای ساعات طولانی‌تری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد دوام داشته باشد. درجه‌ی تبلور LDPE در محدوده ۵۰ تا ۶۰ درصد است که خواص متعددی مانند کدورت، استحکام پارگی، استحکام کششی، استحکام و مقاومت شیمیایی، انعطاف‌پذیری حتی در دمای پایین را برای مواد فراهم می‌کند [۹]. دو نوع مختلف از LDPE وجود دارد، پلی‌اتیلن خطی با چگالی کم (LLDPE)<sup>۴</sup> و پلی‌اتیلن با چگالی کم شاخه‌ای (BLDPE)<sup>۵</sup>. آن‌ها چگالی متفاوت، درجه‌ی انشعاب و در دسترس بودن گروه‌های عاملی روی سطح را نشان می‌دهند. فیلم‌های LDPE شفاف، عاری از بو و سمیت هستند. آن‌ها شکل‌پذیری بهتر، نفوذپذیری بخار آب کم و قابلیت مهر و موم حرارتی دارند. به طور گسترده‌ای برای بسته‌بندی

<sup>6</sup> Ultra Violet

<sup>7</sup> Pseudomonas

<sup>8</sup> Ralstonia

<sup>9</sup> Klebsiella

<sup>10</sup> Staphylococcus

<sup>11</sup> Streptococcus

<sup>12</sup> Bacillus

<sup>1</sup> Compostable

<sup>2</sup> Low density polyethylene

<sup>3</sup> High density polyethylene

<sup>4</sup> Linear low density polyethylene

<sup>5</sup> Branched low density polyethylene

جذابی برای میکروبی‌های خاص خاک باشد و این باعث می‌شود که پلی‌آمید سریع‌تر از پلی‌آمیدهای بدون عامل تجزیه‌زیستی مصرف شود. پلی‌آمید ۶،۶ از طریق یک فرآیند تجزیه‌ی بی‌هوازی تجزیه می‌شود که طبق سیگنتالر و همکاران (۲۰۱۱) [16]، معمولاً در فرآیندهای تخریب آبریان، در محل‌های دفن زباله یافت می‌شود یا از نظر فنی برای تولید بیوگاز از زیست‌توده استفاده می‌شود؛ زیرا محصول اصلی تجزیه‌ی گازی متان همراه با CO<sub>2</sub> است.

### ۳-۳- Bio-Nylon

پلی‌آمیدهای پرکاربردی هستند که در مقادیر زیاد از مونومرهای مشتق شده از پتروشیمی تولید می‌شوند. تولید نایلون‌های کاملاً زیست‌پایه با استفاده از دی‌اسیدها و دی‌آمین‌های تولیدشده از طریق تخمیر بسیار موردتوجه بوده اما هنوز محقق نشده است. در اینجا، ما سنتز و خصوصیات بیونیلون<sup>۸</sup>، ۴- و ۵،۴- را گزارش می‌کنیم، دو نایلون که به‌ندرت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، با استفاده از اسید سوسینیک<sup>۹</sup>، ۴-، ۱،۴-دی‌آمینوبوتان<sup>۱۰</sup> و ۱،۵-دی‌آمینوپنتان<sup>۱۱</sup> از طریق تخمیر باکتری‌های مهندسی‌شده متابولیک تولید شد. بیونیلون‌های سنتز شده تحمل حرارت و جذب آب عالی را نشان می‌دهند. برای نشان دادن قابلیت کاربرد، بیونیلون‌ها همچنین با موفقیت به‌عنوان یک عامل مات‌کننده برای کاهش برآیند سطح لاستیک پلی (اکریلونیتریل-کو-استایرن-کو-اکریلیک<sup>۱۲</sup>) استفاده می‌شوند. علاوه بر این، بیونیلون-۴،۴- و ۵،۴- قابل تجزیه‌زیستی هستند و مزایای زیست‌محیطی بیشتری را پس از دفع فراهم می‌کنند. استراتژی سنتز نایلون‌های کاملاً زیست‌پایه شامل تولید و خالص‌سازی پیش‌ساز مونومر تخمیری، پلیمریزاسیون، خصوصیات و توسعه‌ی کاربرد گزارش شده در اینجا می‌تواند به‌عنوان دستورالعملی برای سنتز سایر پلیمرهای کاملاً زیستی از منابع تجدیدپذیر باشد [17].

### ۴- پلاستیک‌هایی که زیست‌تخریب‌پذیر و بر

#### اساس منابع فسیلی هستند

#### ۴-۱- پلی‌لاکتیک اسید (PLA)

PLA نوعی پلی‌استر آلیفاتیک<sup>۱۳</sup> است که از پلیمریزاسیون باز حلقه‌ای مونومر لاکتید<sup>۱۴</sup> به دست می‌آید. مونومرهای اسیدلاکتیک معمولاً از تخمیر مواد تجدیدپذیر مانند ذرت، شکر و سایر مواد اولیه و غیره به دست می‌آیند. قابل بازیافت و کمپوست‌پذیر هستند و در طول عمر کوتاهی تجزیه می‌شوند و

آنزیمی اکسیداتیو و/یا هیدرولیتیک خارج سلولی هستند که جذب و تخریب قطعات پلیمری را تسهیل می‌کند و برهمکنش بین بیوفیلم‌ها و سطوح پلیمری را کنترل می‌کند [12]. آواستی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که HDPE پس از تیمار حرارتی از طریق کلبسیلا پنومونیه<sup>۱</sup> تخریب شد. این سویه توانست به شدت به سطوح HDPE بچسبد که منجر به افزایش ضخامت بیوفیلم با کاهش وزن و استحکام کششی فیلم HDPE به ترتیب ۱۸،۴٪ و ۶۰٪ در ۶۰ d شد. تجزیه‌ی بیولوژیکی احتمالی یک فیلم HDPE تصاویر SEM<sup>۲</sup> و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM<sup>۳</sup>) از خوردگی زیرسطحی، ترک‌ها و زبری سطح تولیدشده از طریق باکتری‌ها را نشان می‌دهد [13].

#### ۳-۱-۱- تخریب بیولوژیکی قارچی PE

علاوه بر باکتری‌ها، چندین جنس قارچی از جمله آسپرژیلوس<sup>۴</sup>، کادوسپوریوم<sup>۵</sup>، فوزاریوم<sup>۶</sup>، پنی‌سیلیوم<sup>۷</sup> برای تخریب پلی‌اتیلن گزارش شده است. به‌طور کلی، تصور می‌شود که قارچ‌ها برای تخریب پلی‌اتیلن کارآمدتر از باکتری‌ها هستند؛ زیرا می‌توانند به سطح آب‌گریز پلیمرها بچسبند، آنزیم‌های خارج سلولی تولید کنند که فیبرهای نامحلول را هدف قرار می‌دهند و در رشد استرس‌زا زنده می‌مانند [10]. اندازه‌گیری کاهش وزن یک روش رایج برای تجزیه و تحلیل تجزیه‌زیستی پلی‌اتیلن است. داس و کومار (۲۰۱۴) زوال میکروبی LDPE از طریق آسپرژیلوس و فوزاریوم را مورد مطالعه قرار دادند. در میان آن‌ها فوزاریوم حداکثر کاهش وزن را در حدود ۹-۸٪ نشان داد، در حالی که تنها ۵٪ کاهش وزن از طریق آسپرژیلوس مشاهده شد [14].

#### ۳-۲- Bio-Polyamide 6.6 Fiber

پلی‌آمید ۶،۶ استحکام مکانیکی خوبی دارد؛ اما تجزیه‌پذیری زیستی پایینی از خود نشان می‌دهد و نقطه‌ی ذوب بالایی دارد. با توجه به ردونو (۲۰۱۶) [15]، فیبر پلی‌آمید زیست‌تخریب‌پذیر ثبت شده با افزودن یک عامل تجزیه‌زیستی در طول اکستروژن پلی‌آمید ۶،۶ در حال ذوب به دست آمد؛ بنابراین عامل تجزیه‌زیستی قبل از تشکیل لیاف با پلی‌آمید مذاب مخلوط می‌شود. این افزودنی فرآیند تجزیه‌زیستی را از طریق یک سری فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی افزایش می‌دهد که در محل دفن زباله‌ی فعال بیولوژیکی دفع شود. فرآیند تجزیه‌زیستی با عوامل متورم‌کننده شروع می‌شود که وقتی با گرما و رطوبت ترکیب می‌شود، ساختار مولکولی پلی‌آمید را گسترش می‌دهد. عامل تجزیه‌زیستی باعث می‌شود که پلی‌آمید منبع غذایی

<sup>8</sup> Bio-Nylon

<sup>9</sup> Succinic Acid

<sup>10</sup> Diaminobutane

<sup>11</sup> Diaminopentate

<sup>12</sup> Acrylonitrile-Co-Styrene-Co-Acrylic

<sup>13</sup> Aliphatic

<sup>14</sup> Lactide

<sup>1</sup> Klebsiella Pneumoniae

<sup>2</sup> Scan Electron Microscopy

<sup>3</sup> Atomic Force Microscopy

<sup>4</sup> Aspergillus

<sup>5</sup> Cladosporium

<sup>6</sup> Fusarium

<sup>7</sup> Penicillium

CPLA تولید نمی‌شود. پس از ۲ هفته، پس از مخلوط شدن با غذا شروع به تجزیه شدن می‌کند. در یک محیط طبیعی، تخریب ۵ تا ۶ ماه طول می‌کشد و تا ۱۲ ماه به‌طور کامل تجزیه می‌شود [۲].

#### ۴-۵- پلی‌گلیکولید (PGA)<sup>۱۳</sup>

پلی‌گلیکولید یا پلی‌گلیکولیک اسید<sup>۱۴</sup> از طریق تراکم اسید گلیکولیک تهیه شده است. این یکی از ساده‌ترین پلی‌استرهای آلیفاتیک با دمای انتقال شیشه‌ای C ۳۳/۴۰ (Tg) و نقطه‌ی ذوب<sup>۱۵</sup> (Tm) تقریباً C ۲۲۰/۲۵۰ است. به دلیل بلورینگی<sup>۱۶</sup> بالای ۴۰،۵۵٪ در آب نامحلول است و در اکثر حلال‌های فلئوئوردار حل می‌شود که می‌توان از آن برای تشکیل فیلم‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا استفاده کرد. پلیمر در عرض ۵ تا ۶ ماه به‌طور کامل از طریق ارگانسیم<sup>۱۷</sup> بازجذب می‌شود [۲].

#### ۴-۶- پلی‌بوتیلن آدیپات کوترفتالات (PBAT)<sup>۱۸</sup>

PBAT یک کو پلی‌استر معطر خطی است که از تراکم ۴،۱- بوتاندیول<sup>۱۹</sup> با مخلوطی از اسید ترفتالیک<sup>۲۰</sup> و اسید آدیپیک به دست می‌آید. در غلظت اسید ترفتالیک بیش از ۳۵٪ مول، خواص بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد. با افزایش محتوای بالای ۵۵ درصد، میزان تجزیه‌زیستی PBAT کاهش می‌یابد. PBAT مانند PCL انعطاف‌پذیر و نرم است، بنابراین در تولید فیلم‌ها، بطری‌ها و محصولات قالب‌گیری شده استفاده می‌شود. PBAT را می‌توان با سلولز، نشاسته و سایر پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مخلوط کرد. برای بهبود آب‌گریزی، خواص مکانیکی و حرارتی PBAT با سلولز مخلوط می‌شود [۲].

#### ۴-۷- پلی وینیل الکل (PVA)

PVA پلیمری نیمه‌بلوری است که عمدتاً شامل فازهای آمورف با مقدار کمی بلورینگی است و بسته به درجه هیدرولیز پلی (وینیل استات)<sup>۲۱</sup> از واحدهای ۱، ۳- دیولی یا ۱، ۲- دیولی تشکیل شده است. خواص PVA به‌طور کلی به وزن مولکولی و درجه‌ی هیدرولیز آن بستگی دارد و وزن مولکولی PVA معمولاً بین ۲۰۰۰۰-۴۰۰۰۰۰ متغیر است و بر اساس طول وینیل استات مورد استفاده برای تولید PVA قرار می‌گیرد. درجه‌ی هیدرولیز معمولاً در محدوده ۸۰،۹۹٪ است [۲].

وزن مولکولی و شفافیت بالایی دارند. با تغییر نسبت مونومر، خواص PLA را می‌توان از کریستالی به آمورف تغییر داد. دمای انتقال شیشه‌ای PLA که به‌صورت تجاری در دسترس است شامل ۶۳-۶۳،۸ C است [۲].

#### ۴-۲- پلی‌کاپرولاکتون (PCL)<sup>۱</sup>

PCL یک پلیمر نیمه‌کریستالی، کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر، آسان برای پردازش و ارزان‌قیمت مبتنی بر نفت است. در بسیاری از حلال‌های آلی و معدنی محلول است و دمای انتقال شیشه‌ای C ۶۰ (Tg) دارد که کاربرد آن را به عنوان یک سازگارکننده در فرمولاسیون پلی‌اورتان افزایش می‌دهد. افزودن PCL به پلیمر کیتوزان آب‌دوست، آب‌گریزی کلی مخلوط را افزایش می‌دهد. مقادیر کم نرخ انتقال بخار آب (WVTR<sup>۲</sup>) در مقایسه با فیلم‌های خالص در ترکیب مشاهده می‌شود. به دلیل این خاصیت، مواد غذایی ذخیره‌شده در چنین فیلم‌هایی ماندگاری طولانی‌تری دارند [۲].

#### ۴-۳- سوکسینات پلی‌بوتیلن (PBS)<sup>۳</sup>

سوکسینات‌های پلی‌بوتیلن متعلق به خانواده پلی‌آلکاندی کربوکسیلات<sup>۴</sup> هستند و از پلی‌تراکم گلیکول‌هایی<sup>۵</sup> مانند ۴،۱- بوتاندیول<sup>۶</sup> و اتیلین گلیکول<sup>۷</sup> با اسیدهای دی‌کربوکسیلیک آلیفاتیک<sup>۸</sup> مانند اسید آدیپیک<sup>۹</sup> و سوکسینیک<sup>۱۰</sup> به دست می‌آیند. این یک پلیمر کریستالی سفیدرنگ است، با فرآیندپذیری خوب و دارای Tg ۱۰-۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و نقطه‌ی ذوب ۹۰ تا ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با ۳۳۰ درصد کشیدگی در هنگام شکست PBS. دارای خواص مکانیکی تقریباً مانند پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) است [۲].

#### ۴-۴- پلی‌اکتید آلیفاتیک کوپلیمر (CPLA)<sup>۱۲</sup>

CPLA از مخلوط لاکتید که یک منبع تجدیدپذیر است و اسید دی‌کربوکسیلیک که یک پلی‌استر آلیفاتیک است تشکیل می‌شود. خواصی مانند PP و PS دارد که به درصد پلی‌استر موجود در مخلوط بستگی دارد. تا دمای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پایدار است. در طول احتراق مقدار CO<sub>2</sub> در مقایسه با احتراق تولیدشده PE و PP بسیار کم است. هیچ ماده‌ی سمی در طی سوزاندن

<sup>13</sup> Polyglycolide

<sup>14</sup> Polyglycolic acid

<sup>15</sup> Melting point

<sup>16</sup> Crystallinity

<sup>17</sup> Organism

<sup>18</sup> Polybutylene adipate-co-terephthalate

<sup>19</sup> Butanediol

<sup>20</sup> Terephthalic acid

<sup>21</sup> Vinyl-acetate

<sup>1</sup> Polycaprolactone

<sup>2</sup> Water vapor transmission rate

<sup>3</sup> Polybutylene succinate

<sup>4</sup> Polyalkenedicarboxylate

<sup>5</sup> Glycol

<sup>6</sup> Butanediol

<sup>7</sup> Ethylene glycol

<sup>8</sup> Aliphatic dicarboxylic acids

<sup>9</sup> Adipic

<sup>10</sup> Succinic acid

<sup>11</sup> Transition temperature

<sup>12</sup> Polylactide aliphatic copolymer

#### ۴-۸- کربنات پلی پروپیلن (PPC)<sup>۱</sup>

می‌شود. با تغییر منبع، محتوای آمیلوز و آمیلوپکتین تغییر می‌کند. ازدیاد طول و استحکام با افزایش محتوای آمیلوز افزایش می‌یابد. نشاسته بیشتر به‌عنوان نشاسته ترموپلاستیک (TPS)<sup>۱۰</sup> استفاده می‌شود. TPS به رطوبت بسیار حساس است و خواص حرارتی با محتوای آب تغییر می‌کند. در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی از نشاسته ذرت به‌عنوان TPS استفاده می‌شود.

سلولز یک پلیمر خطی است که از واحدهای تکرارشونده‌ی سلولزی تشکیل شده است. کریستالی است و در حلال‌های آلی نامحلول است. به دلیل حل نشدن و روان بودن کم، به اشکال مختلف برای کاربردهای تبدیل می‌شود. این تبدیل با درجات مختلف جایگزینی به دست می‌آید. با افزایش درجه‌ی جانمایی، خواص مکانیکی و سرعت تخریب کاهش می‌یابد. استات سلولز<sup>۱۱</sup> (CA) یکی از مشتقات مهم سلولز با استحکام کششی مانند پلی پروپیلن است. دمای انتقال شیشه‌ای بالا (Tg) کاربرد CA را در پردازش حرارتی محدود می‌کند [2].

#### ۵-۳- کلاژن و ژلاتین<sup>۱۲</sup>

کلاژن یک پروتئین بافت همبند متشکل از پلی پپتیدهای مختلف است که شامل هیدروکسی پرولین<sup>۱۳</sup>، پرولین<sup>۱۴</sup>، گلیسین<sup>۱۵</sup> و لیزین<sup>۱۶</sup> است. محتوای گلیسین مسئول انعطاف پذیری کلاژن است. آن‌ها در فیلم‌های سلولزی و PVA گنجانده می‌شوند. فیلم ترکیبی سلولزی شکننده و ضعیف است. پلی پپتید با وزن مولکولی بالاتر که در اثر تخریب شیمیایی کلاژن ایجاد می‌شود ژلاتین است. این دارای توانایی‌های عالی در تشکیل فیلم است و از ۱۹ اسیدآمین تشکیل شده است. توزیع وزن مولکولی، ترکیب اسیدآمین و نوع پلاستی‌سایزر<sup>۱۷</sup> مورد استفاده تأثیر زیادی بر مانع و خاصیت مکانیکی فیلم دارد [18]. پایداری حرارتی محدود در طول پردازش عامل مهمی است که کاربردهای آن را محدود می‌کند. برای بهبود یا اصلاح خواص مکانیکی و بازدارنده‌ی فیلم، افزودنی‌های مختلفی برای دستیابی به فیلم‌های عالی برای بسته‌بندی مواد غذایی اضافه می‌شود [2].

#### ۵-۴- گلوتن گندم و پروتئین سویا

گلوتن گندم قیمت پایینی دارد و محصول فرعی تولید نشاسته است. سرعت تجزیه آن در مقایسه با سایر پلیمرها بدون محصولات جانبی مضر بالاتر است. این یک عامل فیلم‌ساز عالی است؛ اما بدون نرم‌کننده شکننده است. کنسانتره پروتئین سویا

PPC رایج‌ترین پلی کربنات آلیفاتیک است که از CO<sub>2</sub> و کربنات پروپیلن<sup>۲</sup> با کوپلیمریزاسیون تولید می‌شود. فیلم‌های PPC دارای مزایایی مانند خواص کششی و مانع (بخار O<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O) بهتر در مقایسه با ترکیب PBAT، LDPE و PE/نشاسته هستند. مقاومت پارگی فیلم‌های PPC کمتر از PBAT است. اما بهتر از مخلوط‌های LDPE و PE/نشاسته باقی می‌ماند. با این حال، PPC آمورف دارای چندین محدودیت از جمله پایداری حرارتی ضعیف، انقباض زیاد، خواص مکانیکی ناکافی، دمای انتقال شیشه‌ای پایین (۲۵،۴۵ درجه سانتی‌گراد) و تغییر در عملکرد پلیمر بسته به نوع کاتالیزور مورد استفاده برای تهیه PPC است [۲].

#### ۵-۵- پلیمرهایی که مستقیماً از زیست توده یا مواد طبیعی استخراج و جدانشده‌اند

##### ۵-۱- کیتین و کیتوزان<sup>۳</sup>

کیتین یک کوپلیمر خطی است. بسته به روش پردازش، مونومرها به طور تصادفی از طریق پلیمر مرتب می‌شوند. به‌وفور در دسترس است و به‌عنوان آمینو سلولز<sup>۴</sup> در نظر گرفته می‌شود. کیتین عمدتاً در پوسته حشرات، خرچنگ‌ها، میگوها و غیره وجود دارد. منبع دیگر کیتین از کشت قارچ است که محتوای پروتئین آن بین ۱۰ تا ۱۵ درصد است. حلالیت کیتین بسیار کم است. بنابراین معمولاً برای بسته‌بندی مخلوط می‌شود. کیتیناز<sup>۵</sup> کیتین را تجزیه می‌کند [۲].

N-د استیل شدن<sup>۶</sup> جزئی کیتین، کیتوزانی را تشکیل می‌دهد که در آب نامحلول است و در محلول‌های اسیدی بسیار کمی حل می‌شود و دارای ساختار بلوری فشرده و پیوند هیدروژنی قوی است. کیتوزان از طریق کیتوزاناز یا لیزوزیم<sup>۷</sup> تجزیه می‌شود. نامحلول بودن آن‌ها در بیشتر حلال‌ها کاربرد کیتین و کیتوزان را محدود می‌کند. کیتین و کیتوزان دارای خواص ضد میکروبی خوبی برای انواع قارچ‌ها، مخمرها و باکتری‌های موجود در غذا هستند [۲].

##### ۵-۲- نشاسته و سلولز

نشاسته از آمیلوپکتین<sup>۸</sup> و آمیلوز<sup>۹</sup> تشکیل شده است. به‌وفور در دسترس است و از گندم، برنج، سیب زمینی و ذرت استخراج

<sup>10</sup> Thermoplastic starch

<sup>11</sup> Cellulose Acetate

<sup>12</sup> Collagen and Gelatine

<sup>13</sup> Hydroxyproline

<sup>14</sup> Proline

<sup>15</sup> Glycine

<sup>16</sup> Lysine

<sup>17</sup> Plasticizer

<sup>1</sup> Polypropylene carbonate

<sup>2</sup> Propylene carbonate

<sup>3</sup> Chitin and chitosan

<sup>4</sup> Amino cellulose

<sup>5</sup> Chitinase

<sup>6</sup> Deacetylation

<sup>7</sup> Lysozymes

<sup>8</sup> Amylopectin

<sup>9</sup> Amylose

WVTR بیشتر در  $38^{\circ}\text{C}$  و  $90\% \text{RH}$  اندازه‌گیری می‌شود. پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر نفوذپذیری آب کمتری نسبت به پلیمرهای ترموپلاستیک دارند؛ بنابراین می‌توان از آن‌ها برای ذخیره‌سازی محصولات خشک استفاده کرد. حفظ بخار آب PBS بسیار ضعیف است، بنابراین کاربرد آن به‌تنهایی حداقل است. PBS هنگامی که با PLA در نسبت ۸۰:۲۰ مخلوط می‌شود، ترکیبی با حفظ بخار آب خوب تشکیل می‌دهد [24].

### ۳-۶- سرعت انتقال اکسیژن (OTR)<sup>۸</sup>

ضرایب نفوذپذیری اکسیژن ( $\text{O}_2\text{PC}^9$ ) مقدار اکسیژنی را نشان می‌دهد که می‌تواند از ماده در واحد سطح و زمان تحت فشار عبور کند [ $\text{Kg mm}^{-2} \text{S}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ]. در نتیجه OPC پایین، فرآیند اکسیداسیون مهار می‌شود که باعث افزایش ماندگاری محصول می‌شود. OTR معمولاً در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۰٪ اندازه‌گیری می‌شود [۲].

### ۴-۶- ازدیاد طول در نقطه‌ی شکستن<sup>۱۰</sup>

ازدیاد طول در هنگام شکست را می‌توان به‌عنوان نسبت طول تغییر یافته به طول اولیه تعریف کرد. این محاسبات اندازه‌گیری می‌کند که ماده تا چه اندازه می‌تواند بدون شکستگی کشیده شود. این مقادیر نشان دهنده‌ی این است که یک پلیمر چقدر انعطاف‌پذیر است و می‌تواند اشکال مختلفی را تشکیل دهد [۲۵]. هر چه مقدار بیشتر باشد، پلیمر قوی‌تر است. بیشتر ترموپلاستیک‌ها دارای درصد کشیدگی بالایی هستند. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر معمولاً درصد کشیدگی پایینی دارند. در کیتوزان نشاسته‌ای، فیلم‌های کامپوزیتی که نسبت کیتوزان به نشاسته را تغییر می‌دهند، ازدیاد طول در هنگام شکست افزایش می‌یابد [۲].

### ۵-۶- نقطه‌ی ذوب

دمایی که در آن ماده شروع به تغییر ساختار خود می‌کند یا نقطه‌ای که تغییر فاز مشاهده می‌شود دمای ذوب (Tm) نامیده می‌شود. این یک ویژگی ترمودینامیکی پلیمر است که قبل از تغییر شکل، حداکثر دمایی را که می‌تواند نگه دارد، بدانند. عمدتاً دماهای ذوب در محدوده‌های مختلف دیده می‌شود. PET دارای بالاترین  $270-245^{\circ}\text{C}$  Tm است و اغلب برای تشکیل بطری‌ها توصیه می‌شود. در مورد پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، کیتوزان دارای  $290-300^{\circ}\text{C}$  Tm است که برابر با PET است؛ اما کیتوزان به‌تنهایی نمی‌تواند در اشکال مختلف قالب‌گیری شود، بنابراین معمولاً با مواد دیگر ترکیب می‌شود [۲].

کربوهیدرات‌های محلول در آب ندارد. غلظت پروتئین آن ۷۰ درصد است. پروتئین سویای بافتی<sup>۱</sup> (TSP) با دادن مقداری بافت به کنسانتره پروتئین سویا ساخته می‌شود. فیلم‌های TSP به دلیل ماهیت آب دوست پروتئین، مانع و خواص مکانیکی خوبی ندارند. لایه‌های پروتئین سویا جدا شده به رطوبت حساس هستند. فیلم پروتئین سویا ترکیب‌شده با گلیسرول<sup>۲</sup>، صمغ ژلان<sup>۳</sup> یا K-کاراگینان<sup>۴</sup> برای تولید ظروف بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر مبتنی بر سویا است [۲].

### ۶-۶- خواص

#### ۱-۶- استحکام کششی<sup>۵</sup>

حداکثر تنش که یک ماده می‌تواند قبل از شکست تحمل کند، مقاومت کششی آن ماده است. این یکی از رایج‌ترین روش‌های مکانیکی برای تعیین استحکام هر ماده‌ای است [۱۹]. خواص مکانیکی برای محافظت از بسته‌بندی مواد غذایی مهم است. استحکام کششی به نوع پلیمر، شرایط فرآوری، مواد افزودنی، اصلاحات شیمیایی و ترکیبات بستگی دارد. استحکام کششی مواد با فرآیند و ذخیره‌سازی تغییر می‌کند [۲۰]. افزودن NPs (نانوذرات) در ماده‌ای مانند PLA برای تشکیل کامپوزیت‌های زیستی نانو، خواص مکانیکی را افزایش می‌دهد [21]. PLA بیشترین قدرت را دارد در حالی که نشاسته کمترین میزان را دارد. محدوده‌ی مقاومت کششی به نوع مواد افزودنی مورد استفاده در هنگام تشکیل فیلم بستگی دارد. بسیاری از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر در مقایسه با ترموپلاستیک‌ها مانند PLA، PHB، CPLA، دارای مقادیر تقریبی PET، PVC، هستند که نشان می‌دهد که این پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر می‌توانند به‌عنوان یک جایگزین عالی استفاده شوند [۲].

#### ۲-۶- نرخ انتقال بخار آب<sup>۶</sup>

مقدار بخار آبی که در واحد سطح و زمان مواد بسته‌بندی عبور می‌کند، نرخ انتقال بخار آب [ $\text{kg mm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] (WVTR) نامیده می‌شود [۲۲]. محصولات غذایی دارای رطوبت هستند و ماندگاری محصول غذایی کاهش می‌یابد. در برخی موارد، WVTR یک فاکتور مهم در هنگام انتخاب مواد بسته‌بندی است؛ زیرا برخی از محصولات غذایی به سطح رطوبت خاصی مانند محصولات لبنی، گوشت، غذاهای دریایی نیاز دارند. این‌ها به رطوبت داخل بسته‌بندی خود نیاز دارند [۲۳].

<sup>1</sup> Textured soy protein

<sup>2</sup> Glycerol

<sup>3</sup> Gellan Gum

<sup>4</sup> K-carrageenan

<sup>5</sup> Tensile strength

<sup>6</sup> Nanoparticles

<sup>7</sup> Water vapor transmission rate

<sup>8</sup> Oxygen transmission rate

<sup>9</sup> Oxygen Permeability Coefficients

<sup>10</sup> Elongation at break

## ۶-۶- پایداری حرارتی<sup>۱</sup>

پایداری حرارتی پلیمر به عنوان توانایی ماده‌ی پلیمری در مقاومت در برابر حرارت و حفظ آن تعریف می‌شود. خواص آن مانند استحکام، کشش در دمای معین است. پایداری حرارتی پلیمرها معمولاً با آنالیز گرما وزنی (TGA<sup>۲</sup>) تعیین می‌شود. پایداری حرارتی پلیمر به ساختار شیمیایی، درجه‌ی بلورینگی و وزن مولکولی آن بستگی دارد. ساختارهای معطر در ساختمان پلیمری و فرآیندهای پیوند متقابل، پایداری حرارتی پلیمرها را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، پیوندهای مضاعف یا ساختارهای حاوی اکسیژن در زنجیره‌ی اصلی، پلیمرها را در برابر دماهای بالا کمتر مقاوم می‌کند [۲۶].

## ۷- روش‌های تولید بیوپلاستیک

روش‌های تولید بیوپلاستیک را می‌توان به پنج گروه اصلی تقسیم کرد:

بر اساس منشأ مواد اولیه و تولید پلیمر مربوطه تکنولوژی:

۱. به‌طور مستقیم از زیست‌توده استخراج می‌شود

۲. تولیدشده توسط موجودات طبیعی یا اصلاح‌شده‌ی ژنتیکی

۳. سنتز شده از مونومرهای زیستی

۴. سنتز شده از پتروشیمی‌ها

۵. با ترکیب فناوری‌های ذکرشده در بالا و پلیمرهای مشتق شده از آن تولید شده است [۲۷].

## ۸- مسمومیت<sup>۳</sup>

در طول تشکیل پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر یا پلاستیک‌های زیستی، ترکیبات مختلفی مانند افزودنی‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، تثبیت‌کننده‌ها، آغازگرهای زنجیره‌ای، عوامل پیوند متقابل، عوامل هسته‌زا، کاتالیزورها و غیره برای بهبود خواص اضافه می‌شوند. بسیاری از این ترکیبات پیوند کووالانسی با ماتریس پلیمری ندارند، امکان فرآیندی به نام مهاجرت شیمیایی وجود دارد که انسان را در معرض این ترکیبات قرار می‌دهد [28]. ارزیابی سمیت بیوپلاستیک برای افزایش عملکرد محیطی معمولاً در مرحله‌ی تولید یا مرحله تجزیه‌پذیری انجام می‌شود. انتشار مواد شیمیایی توسط مواد در طول استفاده اغلب نادیده گرفته می‌شود. با افزایش کاربرد بیوپلاستیک، ترکیب مواد شیمیایی نیز افزایش می‌یابد. روش‌های سنجش مختلفی برای بررسی سمیت

in vitro مانند سمیت پایه استفاده می‌شود. ۳۷ ماده‌ی شیمیایی غیرفرار در فیلم‌های ساخته‌شده از ترکیب PLA/Bio-PE یافت شد. الیگومرهای حلقوی مانند اسید آدیپیک، اسید فتالیک<sup>۴</sup> و بوتاندیول در بالاترین غلظت یافت شدند. نانو ذرات (NPs) برای بهبود خواص پلیمر برای کاربرد بسته بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند، اما مطالعات بسیار کمی برای نانوتوکسیکولوژی<sup>۵</sup> و نانواکوتوکولوژی<sup>۶</sup> پلیمرهای مختلف زیست‌تخریب‌پذیر گزارش شده است. این ذرات می‌توانند به‌صورت خوراکی، استنشاق و تماس در معرض قرار گیرند. مصرف خوراکی به دلیل مهاجرت شیمیایی نانو ذرات از پلیمر به محصولات غذایی است [۲]. وزن مولکولی نانوذرات کوچک‌تر سریع‌تر جذب‌شده و به‌راحتی در سراسر بدن توزیع می‌شود و به سلول‌ها آسیب می‌رساند. سمیت تنها پارامتر برای مطالعه‌ی پایداری پلاستیک‌های زیستی نیست. عوامل دیگری مانند کاربری زمین، انتشارات گلخانه‌ای، اثرات اجتماعی نیز باید در نظر گرفته شوند. تحقیقات در مورد استفاده از جایگزین‌های شیمیایی ایمن باید انجام شود [۲۹]. علی‌رغم تمام این اثرات سم‌شناسی، بیشتر پلیمرها و پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر در صنایع غذایی کاربرد پیدا کرده‌اند، زیرا فناوری تولید آن‌ها با شناسایی خطر و مشخص‌سازی قبل از استفاده تجاری در مقیاس بزرگ تغییر می‌کند [۲].

## ۹- Bio-Plastic

پلاستیک‌های زیستی ساخته‌شده از پلیمرهای پایه زیستی را می‌توان در دودسته طبقه‌بندی کرد، یا بر اساس قوانین استاندارد موجود زیست‌تخریب‌پذیر و به‌عنوان مواد کمپوست پذیر نامیده می‌شود، یا دسته دیگری از پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر که با استانداردهای تعیین‌شده مطابقت ندارند؛ و به‌عنوان مواد غیرقابل کمپوست برچسب گذاری شده است. با این حال، فرآیند تخریب دیگری وجود دارد که به‌عنوان تخریب اکسو<sup>۷</sup> شناخته می‌شود. این محصولات زیست‌تخریب‌پذیر Oxo تحت استانداردهای فوق تجزیه نمی‌شوند و در واقع قابل تجزیه زیستی یا کمپوست نیستند. به‌عنوان مثال، پلی‌اولفین‌ها مانند پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) اجزای اصلی پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر اکسو هستند که همچنین حاوی افزودنی‌های شیمیایی برای تسریع تخریب هستند، جایی که استانداردهای بالا برای پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر اکسو اعمال نمی‌شوند. فرآیند تخریب پلی‌الین به دو مرحله تقسیم می‌شود. مرحله اول شامل واکنش اکسیژن هوا با پلیمر است. ساختمان کربنی پلیمر اکسید می‌شود و در نتیجه قطعات مولکولی کوچک‌تری ایجاد می‌شود. فرآیندهای

<sup>4</sup> Phthalic acid

<sup>5</sup> Nanotoxicology

<sup>6</sup> Nanoecotoxicology

<sup>7</sup> Oxo-degradation

<sup>1</sup> Thermal stability

<sup>2</sup> Thermo Gravimetric Analysis

<sup>3</sup> Toxicity



PCL یک پلی‌استر زیست‌تخریب‌پذیر است که از پلیمریزاسیون کاپرولاکتون با حلقه بازساخته می‌شود. منبعی تجدیدناپذیر است. به دلیل دمای ذوب پایین و زیست‌تخریب‌پذیری آن، در بیشتر موارد، PCL خالص در کاربردهای پزشکی استفاده می‌شود. نقطه‌ی ذوب پایین ( $62^{\circ}\text{C}$ ) آن را برای اختلاط با پلیمرهای زیستی دیگر (مانند نشاسته) ایده‌آل می‌کند. مخلوط PCL نیز به‌عنوان مواد در تماس با غذا (FCMs) استفاده می‌شود. در همین حال PVOH یک پلیمر وینیل زیست‌تخریب‌پذیر است و برای پوشش‌ها و چسب‌ها و به‌عنوان یک افزودنی استفاده می‌شود. در تولید کاغذ نوع دیگری از بیوپلاستیک در دسته‌ی بیوکامپوزیت<sup>۶</sup> قرار می‌گیرد، همان‌طور که در قسمت بعدی ذکر شد که در آن بیوپلاستیک با الیاف طبیعی مانند کتان، پنبه، چوب تقویت می‌شود؛ و/یا پرکننده‌ها و مواد افزودنی یک رزین ماتریکس زیست‌تخریب‌پذیر تقویت‌شده با الیاف طبیعی اساس بیوکامپوزیت‌های نوآورانه است [۳۰].

#### ۱۰- مروری بر پژوهش‌های اخیر

پیشرفت‌های اخیر در روش‌های تحلیلی برای تخمین صحیح تجزیه‌ی PE بسیاری از محققان میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده‌ی PE را با استفاده از پلیمرهای تجاری موجود که احتمالاً حاوی افزودنی‌های شیمیایی مختلف هستند، بررسی کردند. میزان تخریب با محاسبه‌ی کاهش وزن و تغییرات گروه عملکردی روی سطح پلیمر از طریق FTIR برآورد شد. باین‌حال، بسیار مبهم است که کاهش وزن و تغییرات ساختار سطحی ناشی از تخریب مواد افزودنی است که اغلب بخش عمده‌ای از پلیمر را تشکیل می‌دهند. از این‌رو، تغییرات اساسی بیشتری برای تشخیص تخریب واقعی پلی‌اتیلن و به حداقل رساندن شناسن مصنوعات ناشی از تخریب مواد افزودنی موردنیاز است [9]. در این راستا، یک روش قوی و قابل اعتماد برای ارزیابی زیست‌تخریب‌پذیری پلی‌اتیلن از طریق تعیین کمیت  $\text{CO}_2$  با استفاده از کروماتوگرافی<sup>۷</sup> گازی در نتیجه‌ی تخریب باکتریایی و تنفس معرفی شده است. در اینجا، باکتری خاک R-ردوکروس<sup>۸</sup> در یک محیط آبی تعریف شده با PE به‌عنوان تنها منبع کربن رشد داده شد و تولید  $\text{CO}_2$  مستقیماً با کانی‌سازی منبع کربن اضافه شده از طریق تنفس باکتریایی مرتبط بود. در فاز ثابت، تفاوت معنی‌داری در آزادسازی  $\text{CO}_2$  بین سلول‌های رشد یافته بدون منبع کربن و با LDPE وجود نداشت. این نشان می‌دهد که فراهمی زیستی کربن در رشد باکتری در LDPE محدود است. از این‌رو، تجزیه‌زیستی محدودی را نشان می‌دهد. مکانیسم تجزیه غیرزیستی و زیستی

غیرزیستی در این مرحله‌ی اولیه تجزیه‌ی اکسو مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرحله از تجزیه زیستی اکسو، تخریب اکسیداتیو پلیمر را می‌توان با نور ماوراءبنفش (UV) یا با تخریب حرارتی با استفاده از گرما در طول زمان تسریع کرد. مرحله‌ی دوم شامل تجزیه بیولوژیکی محصولات اکسیداسیون توسط میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌ها) است که قطعات ساختمان کربن اکسیدشده را برای تولید  $\text{CO}_2$ ،  $\text{H}_2\text{O}$  و زیست‌توده می‌بلعد. پلاستیک‌های تجزیه‌پذیر می‌توانند در صورت قرار گرفتن در معرض نور خورشید به قطعات کوچک‌تر تجزیه شوند، درحالی‌که اکسوی تجزیه‌پذیر به قطعات کوچک‌تر تقسیم می‌شود و به آلودگی میکرو پلاستیک کمک می‌کند. در همین حال، پلیمرهای مبتنی بر سلولز پلی‌ساکاریدهای زیست‌تخریب‌پذیر بعدی هستند. باین‌حال، معایب آن‌ها شامل ممانعت کم بخار آب، ویژگی‌های مکانیکی ضعیف، پردازش ضعیف و ضعف (پلیمر سلولزی خالص) است. باین‌حال، فیلم سلولزی کمپوست‌شده را می‌توان در بسته‌بندی نان، گوشت، گوشت‌گاو، محصولات خشک و غیره استفاده کرد. PLA نیز به‌عنوان یکی از اشکال ترموپلاستیک پلی‌استر زیست‌تخریب‌پذیر شناخته می‌شود. این شامل جایگزین‌هایی برای پلی‌اتیلن (LDPE و HDPE)، پلی‌استایرن (PS) و PET با چگالی کم و زیاد است و به‌طور گسترده در ساخت ظروف نیمه‌شفاف، سفت، کیسه‌ها و فیلم‌ها استفاده می‌شود. علاوه‌براین، پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها<sup>۱</sup> (PHA) به‌عنوان پلیمرهای تجزیه‌شده پلی‌استر نیز شناخته می‌شوند. از نظر شیمیایی، پلیمرهای این نوع متمایز هستند. علاوه‌براین، شکنندگی، سفتی و فرارایت حرارتی ذاتی نیز دارند. افزون بر آن، پلی پروپیلن زیست پایه (PP) و پلی اتیلن (PE) پلیمرهای وینیل غیرقابل تجزیه‌زیستی هستند. آن‌ها عمدتاً از نیشکر تولید می‌شوند و خواص فیزیکی شیمیایی مشابهی دارند. به‌غیر از آن، پلی اتیلن فورانات<sup>۲</sup> زیستی (PEF) نیز یک پلی‌استر غیرقابل تجزیه زیستی بر اساس پنج ساختار حلقه‌ی هتروآروماتیک<sup>۳</sup> است. همچنین به‌عنوان یک بافر قوی‌تر از PET عمل می‌کند. مسلماً این یک ماده‌ی خام ۱۰۰٪ است که پایه زیستی دارد و در آینده می‌تواند در بطری‌ها و فیلم‌ها استفاده شود. پلی‌آمیدها (PA) نمونه‌ی دیگری از پلیمرهای غیرقابل تجزیه‌زیستی هستند. آن‌ها به‌طور گسترده در مواد تماس‌یافته با غذا (FCMs<sup>۴</sup>) یافت نمی‌شوند و در پلیمرهای با کارایی بالا استفاده می‌شوند. پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر از سوخت‌های فسیلی مانند پلی کاپرولاکتون<sup>۵</sup> (PCL) و (PVOH) به همان اندازه مهم هستند.

<sup>1</sup> Polyhydroxyalkanoates

<sup>2</sup> Polyethylene furanoate

<sup>3</sup> Heteroaromatic

<sup>4</sup> Food Contact Materials

<sup>5</sup> Polycaprolactone

<sup>6</sup> Biocomposite

<sup>7</sup> Gas chromatography

<sup>8</sup> R. rhodochrous

نسبت‌هایی از بین می‌رود. مقاومت ذاتی آن در برابر تخریب محیط زیست یک نگرانی جهانی است. در این پژوهش از LDPE به‌عنوان رزین ماتریکس استفاده شده است که با ترکیباتی که می‌تواند باعث تجزیه‌زیستی آن شود، مخلوط شده است. همه‌ی تولیدکنندگان پلی‌اتیلن و آنتی‌اکسیدان را به رزین اضافه می‌کنند، زیرا ذاتاً ناپایدار است، به‌ویژه هنگامی که در معرض نور ماوراءبنفش (UV) قرار می‌گیرد. زنجیره‌ی پلیمری از طریق تشکیل رادیکال‌های آزاد به دلیل پیوند کربن بسیار غیراشباع در مولکول‌های آن، شکافته و اکسید می‌شود؛ بنابراین، می‌توان آن را از این طریق تجزیه کرد، اما معمولاً اکسیدان تا یک سال دوام می‌آورد. از این رو پلی‌اتیلن کم‌چگالی (تولیدشده در مجتمع پتروشیمی بندر امام) که ذاتاً در برابر اکسیداسیون و زیست‌تخریب‌پذیری تقویت شده است، برای بررسی انتخاب شده است. نشاسته‌ی ذرت و اوره به رزین ماتریکس اضافه شده است و مقاومت مکانیکی آزمایش شده است [۳۵].

در پژوهشی که راپیسردا و همکاران (۲۰۲۰) [۳۶] بر روی گوجه‌فرنگی تازه برش‌خورده انجام دادند، یک بسته‌بندی PLA قابل کمپوست و مبتنی بر سلولز و با ظرف از جنس PET و فیلم PP مقایسه شد. بسته‌بندی قابل کمپوست ماندگاری گوجه‌فرنگی گیلاسی تازه بریده‌شده را طولانی‌تر کرد. بسته‌بندی همچنین ویژگی‌های بهتری را نشان داد که با درمان استریلیزاسیون فرابنفش (UV) افزایش یافت. برای مثال، سرعت انتقال بخار آب بالایی را نشان می‌دهد که منجر به یک اثر ضدمه می‌شود که رشد میکروبی را برای مدت طولانی نسبت به نمونه‌ی پلاستیکی مبتنی بر نفت کاهش می‌دهد.

فیلم‌های بسته‌بندی فعال به دست‌کم‌تای و همکاران (۲۰۱۹) [۳۷] با استفاده از PLA و ساخته‌شده‌اند. کربوکسی‌متیل سلولز برای افزایش عمر نگهداری انبه استفاده شد. میوه‌های انبه میزان تعریق بالایی دارند که باعث بدتر شدن طراوت آن‌ها می‌شود. کامپوزیت فیلم بسته‌بندی حاصل از انعطاف‌پذیری فیلم خوبی برخوردار بود و در نتیجه کنترل رطوبت بهبودیافته، ماندگاری انبه را به مدت ۴۲ روز افزایش داد و در نتیجه نرخ تنفس میوه‌ها را کاهش داد. ظرف‌های PLA پیچیده شده با فیلم‌های PLA نیز از سوی پانسری و همکاران (۲۰۱۸) [۳۸] برای استفاده به‌عنوان محلول بسته‌بندی گوشت قرمز تازه در یخچال مورد بررسی قرار گرفتند. این‌ها با بسته‌بندی‌های معمولی از ظرف‌های پلی‌اتیلن ترفتالات/پلی‌اتیلن آمورف پیچیده شده با پلاستیک پلی‌وینیل کلرید مقایسه شدند. سیستم بسته‌بندی PLA توانست رنگ قرمز تازه را برای مدت طولانی تری نسبت به مواد بسته‌بندی معمولی حفظ کند و به‌طور مؤثر دو روز بیشتر

پلی‌اتیلن علاوه‌براین، اثر پیش‌تیمار UV بر تجزیه‌پذیری زیستی LDPE با انکوباتور<sup>۱</sup> R- ردکروس با LDPE پیش‌تیمار شده با UV و LDPE بومی به مدت ۳۵ روز مورد مطالعه قرار گرفت و CO<sub>2</sub> آزادشده در طول زمان اندازه‌گیری شد. تجزیه‌ی زیستی LDPE تیمار شده با UV سه برابر بیشتر از LDPE تیمار نشده بود [31]. زومستاین و همکاران [۳۲] از پلیمر نشان‌دار شده با C<sub>13</sub> بوتیلن آدیپات کوترفتالات<sup>۲</sup> (PBAT) استفاده کرد و تجزیه‌پذیری زیستی در خاک را بررسی کرد. میکروارگانیسم‌های مختلف خاک و قارچ‌های رشته‌ای برای استفاده از کربن از هر واحد مونومر PBAT به‌عنوان منبع کربن و انرژی یافت شدند. تجزیه‌زیستی و کانی‌سازی<sup>۳</sup> PS با استفاده از PS نشان‌دار شده با C<sub>13</sub> مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۳]. تجزیه و تحلیل مدفوع برداشت شده از لاروهای تغذیه‌کننده با استایروفوم<sup>۴</sup> با استفاده از طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (CP/MAS NMR)<sup>۵</sup> با قطبش متقاطع C<sub>13</sub>/زاویه‌ی جادویی انجام شد که نشان داد ۴۷/۷ درصد کربن فوم آب‌خورده به CO<sub>2</sub> و ۴۹ درصد باقی‌مانده تبدیل شد. به‌عنوان مدفوع با تنها ۰.۵٪ الحاق به زیست‌توده دفع می‌شود؛ بنابراین، آزمایش‌هایی با PS نشان‌دار نشان‌دهنده‌ی تخریب PS به 13 CO<sub>2</sub> و ترکیب آن با لیپیدها بود [۳۴].

همچنین در پژوهشی دیگر ثابت شده است که پلی‌اولفین‌ها به‌ویژه پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE)، در برابر تخریب و حملات میکروارگانیسم‌ها<sup>۶</sup> مقاوم هستند؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین خواص پلاستیک‌های صنعتی، تجزیه‌پذیری زیست‌محیطی آن‌ها است. از آنجایی که پلاستیک‌ها به‌طور گسترده در کشاورزی، باغبانی و بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تأمین این نیاز به‌طور فزاینده‌ای دشوار می‌شود؛ به‌ویژه در ایران به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان مواد پلی‌اتیلن. در این تحقیق، فرمولاسیون‌های مختلف بر پایه‌ی نشاسته و اوره برای ساخت پلی‌اتیلن‌های زیست‌تخریب‌پذیر در خاک و محیط‌های مرطوب مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیبات تولیدشده به‌صورت تزریقی و تحت شرایط طبیعی آزمایش شده و زیست‌تخریب‌پذیری آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است؛ بنابراین امکان تولید یک پلی‌اتیلن با چگالی کم زیست‌تخریب‌پذیر که ماده‌ی زیست‌تخریب‌پذیر زیست‌محیطی است و برای کاربردهای کشاورزی و بسته‌بندی مناسب است. خاک یا محیط ASTM D883-93 نشان می‌دهد که پلاستیک زیست‌تخریب‌پذیر ماده‌ای است که در شرایط خاص، ساختار آن تغییر می‌کند، بنابراین در آزمایش‌های استاندارد،

<sup>1</sup> Incubating<sup>2</sup> Butylene adipate-co-terephthalate<sup>3</sup> Polystyrene<sup>4</sup> Styrofoam<sup>5</sup> Cross polarization/magic angle spinning nuclear magnetic resonance<sup>6</sup> Microorganism

## ۱۲- مراجع

- [1] E. Europe, P., 'Plastics - the facts', 2019. [Online]. Available: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.
- [2] S. Shaikh, M. Yaqoob, and P. Aggarwal, 'An overview of biodegradable packaging in food industry', *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 4, pp. 503–520, 2021, doi: 10.1016/j.crfs.2021.07.005.
- [3] G. Kale, T. Kijchavengkul, R. Auras, M. Rubino, S. E. Selke, and S. P. Singh, 'Compostability of bioplastic packaging materials: An overview', *Macromol. Biosci.*, vol. 7, no. 3, pp. 255–277, 2007, doi: 10.1002/mabi.200600168.
- [4] K. Zeljko, 'Review', no. October, 2017, doi: 10.2376/0003-925X-68-26.
- [5] D. Verma and E. Fortunati, *Biobased and biodegradable plastics*, vol. 4, no. 1722, 2019.
- [6] P. Goswami and T. O'Haire, *Developments in the use of green (biodegradable), recycled and biopolymer materials in technical nonwovens*. Elsevier Ltd, 2016.
- [7] P. R. Salgado, L. Di Giorgio, Y. S. Musso, and A. N. Mauri, 'Recent Developments in Smart Food Packaging Focused on Biobased and Biodegradable Polymers', *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 5, no. April, pp. 1–30, 2021, doi: 10.3389/fsufs.2021.630393.
- [8] Market, 'Retrieved from', 2020, [Online]. Available: <https://www.european-bioplastics.org/market/>.
- [9] S. Ghatge, Y. Yang, J. H. Ahn, and H. G. Hur, 'Biodegradation of polyethylene: a brief review', *Appl. Biol. Chem.*, vol. 63, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s13765-020-00511-3.
- [10] S. Kumar Sen and S. Raut, 'Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review', *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 462–473, 2015, doi: 10.1016/j.jece.2015.01.003.
- [11] A. Sivan, 'New perspectives in plastic biodegradation', *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 22, no. 3, pp. 422–426, 2011, doi: 10.1016/j.copbio.2011.01.013.
- [12] R. A. Wilkes and L. Aristilde, 'Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges', *J. Appl. Microbiol.*, vol. 123, no. 3, pp. 582–593, 2017, doi: 10.1111/jam.13472.
- [13] S. Awasthi, P. Srivastava, P. Singh, D. Tiwary, and P. K. Mishra, 'Biodegradation of thermally treated high-density polyethylene (HDPE) by *Klebsiella pneumoniae* CH001', *3 Biotech*, vol. 7, no. 5, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1007/s13205-017-0959-3.
- [14] M. P. Das and S. Kumar, 'Microbial deterioration of low density polyethylene by *Aspergillus* and *Fusarium* sp', *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 299–305, 2014.

عمر مفید را افزایش دهد. این نتیجه ویژگی‌های حسی و شیمیایی میکروبیولوژی PLA بود. بسته‌بندی گوشت فرآوری شده از فیلم‌های نانو کامپوزیت PLA تعبیه‌شده با مونت موریلونیت<sup>۱</sup> اصلاح‌نشده با تلاش ویلارینهو و همکاران (۲۰۱۸) [۳۹] توسعه یافت. فیلم‌های توسعه‌یافته برای بسته‌بندی سالامی برش‌خورده، یک غذای چرب، استفاده شد. در نتیجه بهبود خواص ممانعت آب، نانو کامپوزیت‌ها توانستند اکسیداسیون لیپیدی گوشت فرآوری شده بسته‌بندی‌شده را به تأخیر بیندازند و به‌طور مؤثری عمر مفید را افزایش دهند. بسته‌بندی فعال برای نان از سوی ساوانامورنلرت و همکاران (۲۰۲۰) [۴۰] با استفاده از فیلم‌های PLA و پلی (بوتیلن-سوکسینات-کوآدیپات<sup>۲</sup>) حاوی تیمول ساخته شد. مواد توسعه‌یافته برای محافظت از قارچ نان در مقایسه با پلی پروپیلن دومحوره مبتنی بر نفت (BOPP<sup>۳</sup>)، یک ماده‌ی بسته‌بندی معمول نان، ارزیابی شد. رشد کپک در کامپوزیت زیست‌تخریب‌پذیر پس از ۹ روز در انبار مشاهده شد، در حالی که در BOPP، پس از سه روز بود که نشان‌دهنده بهبود در ماندگاری بود. تعداد مخمر و کپک با مقدار دی‌اکسیدکربن که BOPP بیشتر بود در ارتباط بود.

## ۱۱- نتیجه‌گیری

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید و پردازش پلاستیک کمک می‌کنند. از آنجایی که پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر از مواد اولیه تجدیدپذیر، ضایعات کشاورزی ساخته می‌شوند، فرصت بسیار خوبی برای کار تحقیقاتی در استفاده از این فرصت اقتصادی وجود دارد. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر در حال حاضر تنها جایگزین حدود ۱٪ از پلاستیک‌ها می‌شوند. عوامل متعددی مانند تغییرات در سیاست‌ها و قوانین و همچنین تقاضای جهانی برای منابع غذایی و انرژی بر توسعه‌ی پلیمرهای برپایه‌ی زیستی تأثیر می‌گذارد که برای بسته‌بندی مواد غذایی و سایر کاربردها با سرعت زیادی در حال افزایش است. با این حال، قبل از اتخاذ هرگونه بسته‌بندی برای مواد غذایی، باید مطالعات مناسبی در مورد برهمکنش بین اجزای غذا و بیوپلیمرها در طول پردازش و ذخیره‌سازی انجام شود. مطالعات آینده باید بر روی استفاده از فناوری نانو و حسگرهایی متمرکز شود که می‌تواند به انتقال اطلاعات به مصرف‌کنندگان کمک کند. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر می‌توانند به پایداری کلی محیط‌زیست کمک کنند.

<sup>1</sup> Montmorillonite<sup>2</sup> Butylene-succinate-co-adipate<sup>3</sup> Biaxially Oriented Poly Propylene

- [29] J. Muncke et al., 'Impacts of food contact chemicals on human health: A consensus statement', *Environ. Heal. A Glob. Access Sci. Source*, vol. 19, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1186/s12940-020-0572-5.
- [30] E. RAND, 'Product Packaging', *Ellis Isl. Snow Globe*, pp. 207–238, 2021, doi: 10.2307/j.ctv11cw45p.12.
- [31] B. Eyheraguibel et al., 'Characterization of oxidized oligomers from polyethylene films by mass spectrometry and NMR spectroscopy before and after biodegradation by a *Rhodococcus rhodochrous* strain', *Chemosphere*, vol. 184, pp. 366–374, 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.05.137.
- [32] M. T. Zumstein et al., 'Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO<sub>2</sub> and microbial biomass', *Sci. Adv.*, vol. 4, no. 7, 2018, doi: 10.1126/sciadv.aas9024.
- [33] J. L. Yang Y, Yang J, Wu W, Zhao J, Song Y, Gao L, Yang R, 'Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic eating mealworms', *Env. Sci Technol*, 2015.
- [34] S. S. Yang et al., 'Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): Factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle', *Chemosphere*, vol. 191, pp. 979–989, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.117.
- [35] T. Angaji and H. Reza, 'Preparation of Biodegradable Low Density Polyethylene by Starch – Urea Composition for Agricultural Applications Torabi'.
- [36] M. Rapisarda et al., 'Envases compostables a base de polilactida y celulosa para tomates cherry recién cortados: evaluación del rendimiento e influencia del tratamiento de esterilización.', *Materiales*, vol. 13, no. 15, pp. 1–18, 2020.
- [37] S. Kamthai and R. Magaraphan, 'Development of an active polylactic acid (PLA) packaging film by adding bleached bagasse carboxymethyl cellulose (CMC B ) for mango storage life extension', *Packag. Technol. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 103–116, 2019, doi: 10.1002/pts.2420.
- [38] S. Panseri et al., 'Feasibility of biodegradable based packaging used for red meat storage during shelf-life: A pilot study', *Food Chem.*, vol. 249, no. December 2017, pp. 22–29, 2018, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.12.067.
- [39] F. Vilarinho, A. Sanches Silva, M. F. Vaz, and J. P. Farinha, 'Nanocellulose in green food packaging', *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 58, no. 9, pp. 1526–1537, 2018, doi: 10.1080/10408398.2016.1270254.
- [40] 'Erratum regarding missing Conflict of Interest statements in previously published articles (*Food Packaging and Shelf Life* (2020) 25, (S2214289419307835), (10.1016/j.fpsl.2020.100515))', *Food Packag. Shelf Life*, vol. 29, no. June, p. 100626, 2021, doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100626.
- [15] R. et al. Redondo, 'Biodegradable polyamide fiber, a process for obtaining such Fiber and polyamide article made therefrom', 2016.
- [16] K. O. Siegenthaler, A. Künkel, G. Skupin, and M. Yamamoto, 'Ecoflex® and ecovio®: Biodegradable, performance-enabling plastics', *Adv. Polym. Sci.*, vol. 245, no. July 2011, pp. 91–136, 2012, doi: 10.1007/12-2010-106.
- [17] J. A. Lee, J. H. Ahn, I. Kim, S. Li, and S. Y. Lee, 'Synthesis, Characterization, and Application of Fully Biobased and Biodegradable Nylon-4,4 and -5,4', *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 14, pp. 5604–5614, 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c00007.
- [18] Nevada, 'FISH GELATIN: A RENEWABLE MATERIAL FOR DEVELOPING ACTIVE BIODEGRADABLE FILMS Gómez-Guillén', *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 1981.
- [19] W. M. T. and Research, 'Inc', 2020, [Online]. Available: <https://www.wmtr.com/>.
- [20] D. Briassoulis and A. Giannoulis, 'Evaluation of the functionality of bio-based food packaging films', *Polym. Test.*, vol. 69, no. March 2018, pp. 39–51, 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.003.
- [21] D. S. Lee, 'Carbon dioxide absorbers for food packaging applications', *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 57, pp. 146–155, 2016, doi: 10.1016/j.tifs.2016.09.014.
- [22] J. Auras, R., Singh, S.P., Singh, 'Performance evaluation of PLA against existing PET and PS containers', 2006.
- [23] 'Flair Flexible Packaging Corporation', 2020, [Online]. Available: <http://www.flairpackaging.com/home>.
- [24] A. Bhatia, R. K. Gupta, S. N. Bhattacharya, and H. J. Choi, 'Analysis of gas permeability characteristics of poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) nanocomposites', *J. Nanomater.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/249094.
- [25] 'Plastic Materials, Free online database for plastic industry', 2020, [Online]. Available: <https://omnexus.specia>.
- [26] K. ] Król-Morkisz, K., Pielichowska, 'Thermal decomposition of polymer nanocomposites with functionalized nanoparticles', *In Polymer Compos. with Funct. Nanoparticles*, 2019.
- [27] K. Jögi and R. Bhat, 'Valorization of food processing wastes and by-products for bioplastic production', *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 18, 2020, doi: 10.1016/j.scp.2020.100326.
- [28] L. Zimmermann, A. Dombrowski, C. Völker, and M. Wagner, 'Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition', *Environ. Int.*, vol. 145, no. September, p. 106066, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106066.

## **An Overview of the Packaging of Synthetic Biodegradable Plastics**

Asiyeh Ghiafeh Shirzadi, Naser Sedaghat\*

\* Professor Food Industry, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 08/03/2022; Accepted: 07/06/2022)

### **Abstract**

*Ordinary plastics have been produced and used for many years for packaging applications in various sectors. With the growth of the food industry, the demand for food packaging has also grown. However, the plastics made from petroleum are non-degradable, which has created severe bio environmental problems for the environment. Biodegradable polymers are an alternative approach to many industrial applications including food packaging, as well as risk control for non-biodegradable plastics. According to the type of the raw material, they are classified in one of the following categories: polymers extracted from biomass compounds, polymers synthesized from monomers and polymers produced from microorganisms. The quality of biopolymers depends on their physical, mechanical and thermal properties. The present study is an overview of the properties of different biopolymers and their compounds, comparing the properties of biodegradable polymers and biopolymers. The recent research works and innovative methods for the use of these plastics for food packaging and biomass plastic poisoning have also been studied and presented, concluding that biodegradable polymers help reduce the environmental impacts of plastics. It is worth mentioning that as the plastics from agricultural waste are used as raw materials for making this kind of packaging, there is a great opportunity to increase added value.*

**Keywords:** Synthesis, Biodegradable, Polymer, Properties, Production Method of Bioplastics

---

\*Corresponding Author E-mail: sedaghat@um.ac.ir