

# Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: Applications, Limitations and Solutions Thereof

Polymerization  
Quarterly, 2017  
Volume 7, Number 1  
Pages 61-70  
ISSN: 2252-0449

Zoha Chahardehi Sirati<sup>1\*</sup>, Farnaz Movahedi<sup>2</sup>, Behzad Kord<sup>2</sup>,  
Mehdi Rohani<sup>2</sup>, Mehrnaz Aminifar<sup>3</sup>

1. Food Science and Technology Department, Pharmaceutical Sciences Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Chemistry and Petrochemical Engineering; 3. Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry and Agriculture; Standard Research Institute, Karaj, Iran

Received: 6 February 2016, Accepted: 5 June 2016

## Abstract

Materials, including plastics, glass, metals, paper and paperboards which are traditionally used in food packaging industry have the disadvantage of migration into food material, resulting in pollutions, wastes and recycling problems. Plastic wastes from food packaging materials are always a big concern for the environment. Therefore, recent researches have been focused on finding suitable alternatives for these types of packaging materials. Eco-friendly biodegradable polymers can be considered as a suitable option. On the other hand, the use of such biopolymers as food packaging materials is subjected to several limitations. The major factors limiting their application in food packaging include brittleness, stiffness, thermal instability and high water vapor and gas permeability. Coating, blending, and chemical/physical modifications are the most recent strategies for improving the properties of biopolymers. This study discusses the properties and limitations of biodegradable polymers used in food packaging as well as approaches for their modification.

## Keywords

biodegradable polymers,  
food industry,  
packaging,  
nanoparticles,  
shelf life

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: zoha.sirati@yahoo.com

## پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی: کاربردها، محدودیت‌ها و راه‌حل‌های رفع آن‌ها

ضحی چهاردهی سیرتی<sup>۱\*</sup>، فرناز موحدی<sup>۲</sup>، بهزاد کرد<sup>۳</sup>، مهدی روحانی<sup>۴</sup>، مهرناز امینی‌فر<sup>۵</sup>  
 ۱- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم دارویی؛  
 کرج، پژوهشگاه استاندارد: ۲- پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، گروه پژوهشی سلولوزی و بسته‌بندی؛  
 ۳- پژوهشکده غذایی و کشاورزی، گروه پژوهشی مواد غذایی

دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۱۶

امروزه در بسته‌بندی مواد غذایی از مواد پلاستیکی، نفتی، شیشه، فلزات و کاغذ استفاده می‌شود. کاربرد این مواد در بسته‌بندی معایب متعددی را به دنبال دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به مهاجرت ترکیبات استفاده شده در فرمول‌بندی بسته‌بندی به ماده غذایی، ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی و مشکلات بازیافت آن‌ها اشاره کرد. زباله‌های پلاستیکی به‌جا مانده از بسته‌بندی محصولات غذایی همواره به‌عنوان معضل بزرگی برای محیط زیست مطرح هستند. از این‌رو، پژوهش‌های جدید به یافتن جایگزین‌های مناسب برای بسته‌بندی‌های متداول معطوف شده است. زیست‌پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط زیست به‌عنوان راه‌حل مناسب برای این موضوع پیشنهاد می‌شوند. اما، استفاده از زیست‌پلیمرها در بسته‌بندی محصولات غذایی در برابر محدودیت‌های متعددی قرار دارد. شکنندگی، سفتی، ناپایداری گرمایی و نفوذپذیری زیاد نسبت به گازها و بخار آب در زمره عوامل اصلی محدودیت استفاده از زیست‌پلیمرها در صنعت بسته‌بندی هستند. بر این اساس، به پژوهش‌های گسترده‌ای با هدف بهبود بیشتر کارایی زیست‌پلیمرها نیاز است. از روش‌های اخیر در این راستا می‌توان به پوشش‌دهی، مخلوط‌سازی و اصلاح فیزیکی-شیمیایی اشاره کرد. در این مقاله به انواع زیست‌پلیمرهای استفاده شده در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و روش‌های بهبود آن‌ها پرداخته شده است.

بسیار ش  
 فصلنامه علمی- ترویجی  
 سال هفتم، شماره ۱  
 صفحه ۷۰-۶۱، ۱۳۹۶  
 ISSN: 2252-0449

### چکیده



ضحی چهاردهی سیرتی



فرناز موحدی



بهزاد کرد



مهدی روحانی



مهرناز امینی‌فر

### واژگان کلیدی

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر،  
 صنایع غذایی،  
 بسته‌بندی،  
 نانوذرات،  
 عمرنگه‌داری

مقدمه

بسته‌بندی، به معنی ظرف، محافظ یا سامانه‌ای است که سلامت کالای بسته‌بندی شده را در فاصله زمانی پس از تولید و در مراحل حمل‌ونقل، انبارداری و توزیع تا مصرف نهایی حفظ کرده و در کنار مصون نگه‌داشتن کالا از صدمات احتمالی فیزیکی یا شیمیایی، به فروش بهتر آن کمک کند. هدف اصلی از بسته‌بندی، جداسازی مواد غذایی از محیط خارجی و حفاظت غذا در برابر فساد ناشی از فعالیت ریزاندامگان، رطوبت، گازها، گرد و غبار، بوها و همچنین نیروهای مکانیکی است. قرارگیری در برابر این مواد مخرب به کاهش طول عمر غذا منجر شده و در نهایت بر سلامت مصرف‌کننده اثر می‌گذارد. هر جا که غذا در تماس با محیط باز قرار گیرد، آلودگی می‌تواند اتفاق بیفتد. بنابراین، بسته‌بندی مناسب باید به‌عنوان مانع عمل کرده و ماده غذایی را از اثر سه عامل زیستی، شیمیایی و فیزیکی محافظت کند. هدف دیگر بسته‌بندی محصولات، بهبود حمل‌ونقل، انبارش و عرضه محصول است. بسته‌بندی افزون بر ایجاد جذابیت در ظاهر کالا و بازارپسند کردن آن بستر مناسب درج اطلاعاتی است که تولیدکننده موظف است در اختیار مصرف‌کننده قرار دهد. به‌طور کلی، بسته‌بندی سامانه مرکبی است که هم‌زمان وظیفه حفاظت، ارتباط و اطلاع‌رسانی را برعهده دارد و با کاهش ضایعات مواد غذایی، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های فرایند در اقتصاد نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند [۱-۴].

- به‌طور کلی، مواد بسته‌بندی باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:
- برای مواد غذایی، سمی نبوده و بهداشتی باشند،
- در برابر نور، رطوبت، چربی و گاز مقاوم باشند،
- سبک بوده و به‌راحتی حمل شوند،
- درب بسته‌بندی تهیه شده از آن‌ها به‌آسانی باز شود و
- بازیافت زباله آن‌ها آسان بوده و موجب کمترین خسارت برای محیط زیست شود [۱].

موادی که به‌طور معمول در بسته‌بندی مواد غذایی از دیرباز استفاده شده‌اند، شامل شیشه، فلزات، کاغذ و پلاستیک سخت و انعطاف‌پذیر است. براساس مواد به‌کار رفته در صنعت بسته‌بندی در سراسر جهان، ۳۶٪ مواد کاغذی، ۱۷٪ فلز، ۳۴٪ پلاستیک، ۱۰٪ شیشه و ۳٪ سایر مواد استفاده می‌شوند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند [۱-۳].

شیشه در کنار برخورداری از مزایای خنثی‌بودن از نظر شیمیایی، نفوذناپذیری، بی‌بو بودن، بهداشتی بودن و شفافیت دارای معایبی مانند وزن زیاد، حساس بودن به شوک‌های گرمایی و عوامل خارجی و زیادبودن هزینه حمل‌ونقل است. این احتمال نیز وجود دارد که

قسمتی از ظروف شیشه‌ای هنگام پر کردن محصول خرد شده و به داخل مواد غذایی انتقال یابد [۱-۴].

فلزات دارای مزایایی مانند مقاومت زیاد در برابر ضربه‌های خارجی، دمای زیاد، نفوذ رطوبت، نور و اکسیژن هستند. اما، پدیده خوردگی در فلزات در مقایسه با دیگر مواد بسته‌بندی سریع‌تر رخ می‌دهد. در اثر این پدیده تغییراتی در سطح و داخل قوطی ایجاد می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها آزادشدن هیدروژن در داخل قوطی و در ادامه بادکردن قوطی فلزی و سوراخ شدن آن است. خوردگی به‌وجود آمده می‌تواند موجب تغییر رنگ و کاهش ویتامین‌های مواد غذایی شود [۱-۴].

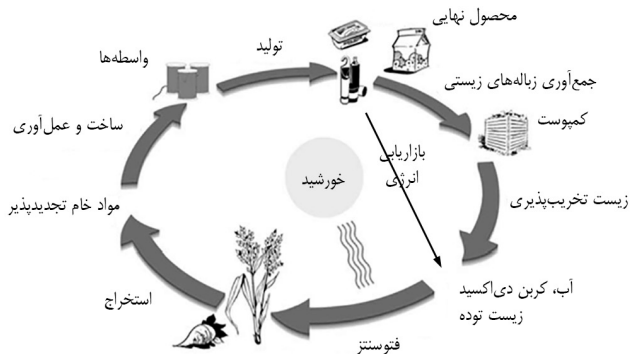
کاغذ افزون بر برخورداری از انعطاف‌پذیری، شکل‌پذیری و چاپ‌پذیری، بازیافت‌پذیری و تجزیه سریع در محیط، سدگر مطلوبی نیز در برابر نور است. اما، در برابر نفوذ رطوبت مقاومت مناسبی ندارد. بنابراین، نفوذ گاز و روغن از آن امکان‌پذیر است و قابلیت دوخت مطلوبی ندارد [۱-۴].

پلاستیک‌های سنتزی دارای وزن مخصوص و قیمت به‌نسبت کم، قابلیت شکل‌پذیری زیاد در دستگاه‌های خودکار بسته‌بندی، مقاومت در برابر تعداد زیادی از اسیدها و بازها هستند. همچنین، با اضافه کردن افزودنی‌ها می‌توان خواص آن‌ها را بهبود بخشید. اما این نگرانی وجود دارد که مواد تشکیل‌دهنده و مونومرهای موجود در پلاستیک مانند تثبیت‌کننده‌ها و نرم‌کننده‌ها به ماده غذایی مهاجرت کنند. افزون بر این، پلاستیک‌ها مشکلات زیست‌محیطی نیز ایجاد می‌کنند [۱-۴].

باوجود این، پلاستیک‌های سنتزی بیشترین کاربرد را در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی دارند. افزایش تولید و حجم مصرف

جدول ۱- سرعت تجزیه مواد در طبیعت [۱-۴].

زمان تجزیه	مواد مصرف شده در بسته‌بندی
۲-۴ هفته	کاغذ
۵ سال	پاکت شیر
۱۰-۲۰ سال	کیسه پلاستیکی
۵۰-۸۰ سال	ظروف پلاستیکی
۸۰ سال	قوطی آلومینیومی
۱۰۰ سال	قوطی حلبی
۴۵۰ سال	بطری پلاستیکی نوشابه
۵۰۰ سال	بطری شیشه‌ای
هرگز تجزیه نمی‌شود	یونولیت



شکل ۲- فرایند زیست تخریب پذیری مواد زیست پلیمر تجدیدپذیر در طبیعت [۶].

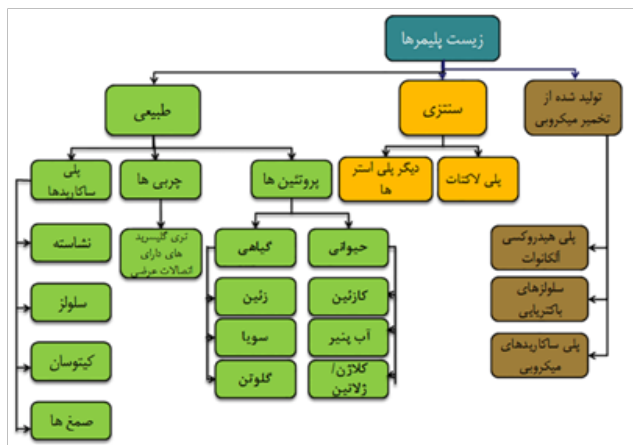
نزدیک به ۹۰٪ این مواد در مدت ۶ ماه تجزیه می شوند. در شکل ۲ چرخه حیات و فرایند زیست تخریب پذیری زیست پلیمرها نشان داده شده است [۵-۸].

در مجموع، از مزایای کاربرد زیست پلیمرها می توان به تجزیه پذیری آن ها در طبیعت، حفظ محیط زیست، ایجاد بازارهای جدید برای فروش محصولات کشاورزی، امکان کنترل انتقال بخار آب، اکسیژن، کربن دی اکسید و چربی در سامانه غذایی و جلوگیری از کاهش طعم و مزه مواد غذایی اشاره کرد [۱، ۶].

### انواع زیست پلیمرها

زیست پلیمرها بر اساس منشا و فرایند تولید در سه دسته قرار می گیرند (شکل ۳):

– زیست پلیمرهای طبیعی یا پلیمرهایی که به طور مستقیم از استخراج زیست توده ها به دست می آیند که کربوهیدرات های گیاهی (نشاسته، سلولوز، کیتوسان، آلژینات، آگار و کاراگینان) و پروتئین های گیاهی و حیوانی (پروتئین سویا، زئین ذرت، گلوتن گندم، ژلاتین، کلاژن، کازئین و پروتئین آب پنیر) از آن جمله هستند.



شکل ۳- انواع زیست پلیمرها [۹].

پلاستیک ها و کامپوزیت های نفتی در زندگی روزمره بشر، به تجمع حجم عظیمی از ضایعات پلاستیکی تجزیه ناپذیر منجر شده که این موضوع به نوبه خود سبب ایجاد مشکلات فراوان زیست محیطی شده است. از بین بردن این ضایعات پلاستیکی تجزیه ناپذیر بسیار پراهمیت است، اما هزینه این کار بسیار زیاد بوده و مشکلات اجرایی فراوانی در این راه وجود دارد. از این رو در سال های اخیر، توجه پژوهشگران به یافتن جایگزین های مناسب برای این نوع مواد بسته بندی معطوف شده است. برای این منظور، زیست پلیمرهایی با قابلیت زیست تخریب پذیری زیاد و سازگاری با محیط زیست گزینه مناسبی به حساب می آیند. سرعت تجزیه مواد بسته بندی مختلف در طبیعت در جدول ۱ نشان داده شده است [۵-۲].

### زیست پلیمرها

زیست پلیمرها، موادی هستند که به وسیله موجودات زنده تولید می شوند. همچنین، آن ها را پلیمرهای تجدید شونده نیز می نامند که از زیست توده ها تولید می شوند. به طور معمول، زیست پلیمرها زیست تخریب پذیرند. به بیان دیگر، زیست پلیمرهای زیست تخریب پذیر مواد پلیمری هستند که دست کم یک مرحله از فرایند تخریب آن ها در محیط زیست، به وسیله موجودات زنده انجام می پذیرد. زیست تخریب در شرایط مناسب از نظر رطوبت، دما و دسترسی اکسیژن و با کمک ریزاندامگان به متلاشی شدن این پلاستیک ها بدون باقی ماندن هر نوع ماده سمی یا مضر برای محیط زیست منجر می شود (شکل ۱). با توجه به تجدید پذیر بودن منابع استفاده شده در تولید این مواد، کربن دی اکسید تولید شده در زمان تخریب به وسیله گیاهان مجدداً به مواد اولیه تبدیل می شود. این گاز پس از مدت زمان محدودی به وسیله باکتری های موجود در محیط مصرف می شود. در نهایت، این نوع پلاستیک ها به شکل توده های زباله در طبیعت باقی نمی ماندند. افزون بر این، تعدادی از زیست پلیمرهای زیست تخریب پذیر که قابلیت کمپوست شدن دارند را می توان در فرایند کمپوست سازی صنعتی به کار برد. بدین ترتیب،



شکل ۱- زیست تخریب زیست پلیمرها [۵].

تعریف و قراردادی شده است. از مهم ترین این شاخص ها خواص سدگری، مکانیکی و گرمایی است که در ادامه به آن ها اشاره می شود [۱۲،۱۳].

### خواص زیست پلیمرها

#### خواص سدگری

خواص سدگری زیست پلیمرها در برابر گازها و بخارها در صنایع غذایی از اهمیت فراوانی برخوردار است، به ویژه، هنگامی که جلوگیری از پدیده های نامطلوبی مانند ازدست رفتن رایحه و رطوبت غذا یا جذب بوهای نامطلوب از محیط و جذب رطوبت از جو به غذاهای خشک مطرح باشد. پلاستیک ها در برابر مولکول های کوچک مانند گازها، بخار آب، مایعات و بخارهای آلی به طور نسبی نفوذ پذیرند. بخار آب و اکسیژن، دو نفوذکننده اصلی هستند که در کاربردهای بسته بندی مواد غذایی مطالعه می شوند، زیرا عبور آن ها از محیط داخلی یا خارجی از راه دیواره پلیمر بسته بندی امکان پذیر است. این موضوع، سبب تغییرات مداوم در کیفیت و زمان ماندگاری محصول می شود. همچنین، کربن دی اکسید در بسته بندی های با جو اصلاح شده از اهمیت زیادی برخوردار است. برای تعیین خواص سدگری فیلم ها عواملی مانند سرعت های عبور اکسیژن، بخار آب و کربن دی اکسید اندازه گیری می شود [۱۲-۱۶].

#### سرعت عبور اکسیژن (OTR)

در میوه ها و سبزی های تازه که دارای تنفس هوازی هستند، اکسیژن تراوایی نسبی فیلم ها از اهمیت زیادی برخوردار است. سدگری در برابر اکسیژن به وسیله ضریب اکسیژن تراوایی تعیین می شود که مقدار اکسیژن عبوری از مواد بسته بندی را در واحد سطح و زمان نشان می دهد ( $\text{kg mm}^2 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ). بنابراین، با کاربرد فیلم بسته بندی پلیمری با ضریب اکسیژن تراوایی اندک، فشار اکسیژن داخل بسته بندی به اندازه ای کاهش می یابد که در آن مکان اکسایش به تأخیر می افتد و زمان ماندگاری افزایش می یابد [۹،۱۰]. به طور معمول، فیلم های زیست پلیمری به دلیل آب دوست بودن، از خواص سدگری مطلوب گاز اکسیژن به ویژه در رطوبت نسبی کم برخوردارند. در شکل ۵ اکسیژن تراوایی در زیست پلیمرهای مختلف با پلیمرهای بر پایه مواد نفتی مقایسه شده است [۱۰].

#### سرعت عبور بخار آب (WVTR)

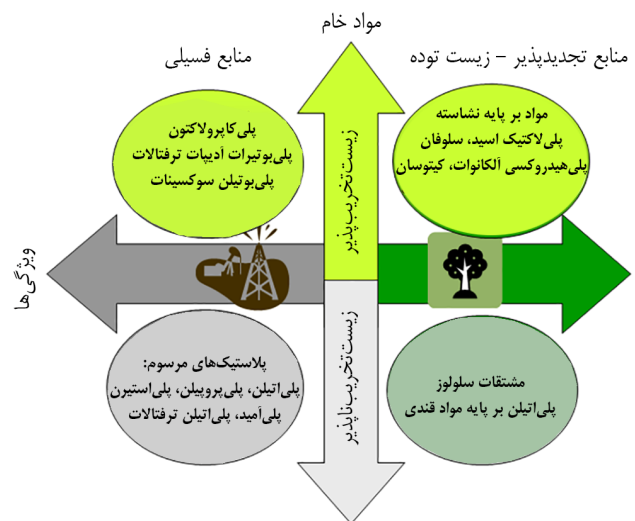
خواص سدگری بخار آب برای محصولات بسته بندی شده ای که فساد فیزیکی و شیمیایی آن ها مرتبط با مقدار رطوبت تعادلی

پلیمرهای زیست تخریب پذیر سنتزی که با به کار بردن فرایندهای شیمیایی از مونومرهای زیست تجدید پذیر تولید می شوند. از این گروه می توان به پلی وینیل الکل (PVA)، پلی گلیکولیک اسید (PGA)، پلی کاپرولاکتون (PCL)، پلی لاکتیک اسید (PLA) و پلی بوتیلن سوکسینات (PBS) اشاره کرد.

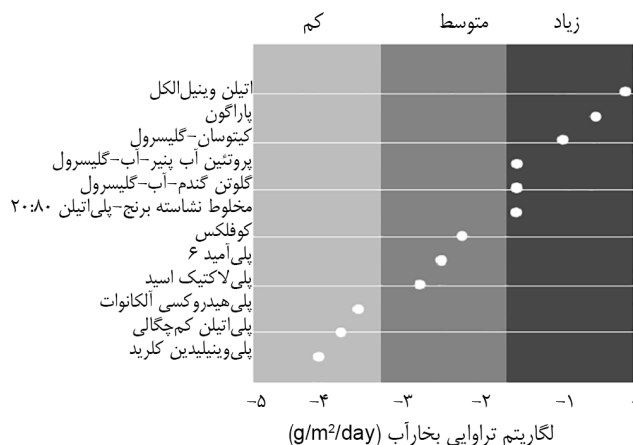
زیست پلیمرهای تولید شده از تخمیر میکروبی، پلیمرهایی هستند که به وسیله ریزاندامگان و باکتری های اصلاح شده ژنتیکی به دست می آیند. موادی مانند پلی هیدروکسی آلکانوات (PHAs)، پلی هیدروکسی بوتیرات (PHB)، سلولوزهای باکتریایی و پلی ساکاریدهای میکروبی مانند زانتان، پلولان در این دسته قرار می گیرند.

نکته در خور توجه اینکه، تمام زیست پلیمرها زیست تخریب پذیر نیستند (مانند پلی اتین های بر پایه مواد زیستی). از سوی دیگر، پلیمرهایی مانند پلی کاپرولاکتون یا PCL نیز وجود دارند که بر پایه مواد فسیلی بوده و قابلیت زیست تخریب پذیری دارند. در شکل ۴ قابلیت زیست تخریب پذیری زیست پلیمرهای و پلیمرهای سنتزی مختلف نشان داده شده است. در حقیقت، سرعت تجزیه پلیمرها به نوع پیوند شیمیایی، گروه های عملکردی و مقدار واکنش پذیری پلیمر با آب و کاتالیزورها بستگی دارد [۱۱-۶].

هنگامی که این زیست پلیمرها به عنوان ماده بسته بندی در صنایع غذایی به کار برده می شوند، باید از خواص مدنظر صنعت، از جمله دوام و کارایی، برخوردار بوده و خواص مشابهی با پلیمرهای نفتی داشته باشند. به منظور ارزیابی کیفیت ساختاری و کارایی زیست پلیمرهای زیست تخریب پذیر مجموعه ای از خواص کیفی



شکل ۴- خواص زیست تخریب پذیری منابع تجدیدپذیر و فسیلی [۱۱].

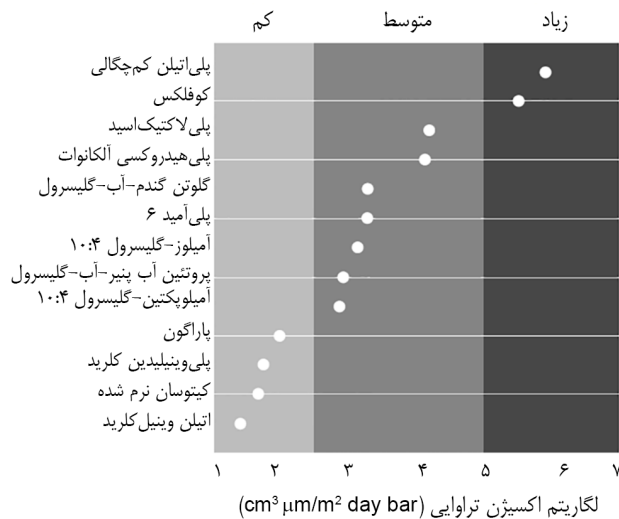


شکل ۶- مقایسه زیست پلیمرها با پلیمرهای سنتزی در تراوایی بخار آب [۱۰].

استفاده می شوند. بنابراین، ارزیابی عملکرد مکانیکی این پلیمرها در شرایط یاد شده بسیار مهم است. آزمون کششی متداول ترین آزمون تعیین توان مکانیکی فیلم هاست. با انجام این آزمون می توان اطلاعات بسیار زیادی را در زمینه خواص مکانیکی ماده مانند استحکام کششی، مدول کشسانی و ازدیاد طول تا پارگی به دست آورد. استحکام کششی از ویژگی های بسیار مهم در فیلم های بسته بندی است. این ویژگی حداکثر تنش ایجاد شده را در فیلم نشان داده و مقاومت فیلم به پارگی را معین می کند. با استفاده از این مقادیر می توان خواص مکانیکی زیست پلیمرها را با پلیمرهای سنتزی متداول مقایسه کرد. با توجه به خواص سدگری و مکانیکی گفته شده، هر زیست پلیمر به عنوان ماده بسته بندی مزایا و معایب خاص خود را دارد که در جدول ۲ عنوان شده است [۶، ۱۰، ۱۴].

### بسته بندی زیست پلیمری، نیاز کیفیتی غذا

به طور کلی، تغییرات فیزیکی، شیمیایی و فساد میکروبی در مدت انبارداری، زوال و ویژگی های حسی، محتویات مواد مغذی و امنیت غذاها را به دنبال دارد. در نتیجه، بسته بندی های بر پایه مواد زیستی باید مانند بسته بندی های رایج، موجب کاهش تغییرات زوال دهنده در مواد غذایی شوند. تغییرات شیمیایی منجر به زوال کیفیت در غذا شامل واکنش های قهوه ای شدن، آبکافت و اکسایش لیپیدها و پروتئین ها و تغییرات گلیکولی است. به منظور کنترل واکنش های شیمیایی، زیست پلیمرها لازم است جو گازی اطراف غذا (اکسیژن، کربن دی اکسید، نیتروژن)، فعالیت آبی، نور و دما کنترل شود. فساد ناشی از رشد میکروبی با کمک زیست پلیمرها و به وسیله کنترل فعالیت آبی، pH و مهاجرت مواد مغذی انجام پذیر است. تغییرات



شکل ۵- مقایسه زیست پلیمرها با پلیمرهای سنتزی در اکسیژن تراوایی [۱۰].

آن هاست، اهمیت زیادی دارد. سدگری بخار آب با ضریب تراوایی بخار آب سنجیده می شود که مقدار بخار آب عبوری از مواد بسته بندی را در واحد سطح و زمان نشان می دهد. در محصولات غذایی تازه لازم است مانع از دست رفتن آب شد. در حالی که، در محصولات نانوائی ممانعت از نفوذ آب ضروری است. به طور کلی، خواص سدگری رطوبت اکثر فیلم های زیست پلیمری برخلاف خواص سدگری آن ها در برابر اکسیژن و سایر گازها، ضعیف است. که این موضوع به سبب خاصیت آب دوستی فیلم های یاد شده است. در شکل ۶ تراوایی بخار آب زیست پلیمرهای مختلف با پلیمرهای بر پایه مواد نفتی مقایسه شده است [۶، ۹-۱۳].

### سرعت عبور کربن دی اکسید

مانند خواص سدگری بخار آب و اکسیژن، سدگری کربن دی اکسید نیز در بسته بندی های مواد غذایی اهمیت دارد. سدگری کربن دی اکسید با ضریب تراوایی کربن دی اکسید تعیین می شود که مقدار کربن دی اکسید عبوری از مواد بسته بندی را در واحد سطح و زمان نشان می دهد [۹، ۱۰].

### خواص مکانیکی

خواص مکانیکی فیلم ها به نیروهای بین مولکولی زنجیرهای پلیمری سازنده آن ها، نسبت ترکیبات سازنده، افزودنی های اضافه شده و شرایط محیطی بستگی دارد. ساختار پلیمر اثر چشمگیری بر فرایندهای به کار رفته برای مدل سازی محصول نهایی دارد. افزون بر این، تعداد زیادی از ظروف بسته بندی در شرایط دمایی محیط

جدول ۲- زیست‌پلیمرها و خواص آن‌ها به‌عنوان فیلم بسته‌بندی [۱۴].

مواد خام	منشأ	مزایا	معایب
زئین	پروتئین اصلی ذرت	ویژگی‌های خوب تشکیل فیلم پس از انحلال در اتانول و استون، سدگری رطوبت و خواص کششی مناسب، فعالیت ضدقارچی و ضد میکروبی، خواص مکانیکی مناسب، تراوایی اندک اکسیژن و کربن دی‌اکسید	شکنندگی
کیتوسان	ترکیبات خانواده کیتین	-	حساسیت زیاد به آب
پروتئین جداشده سویا (soy protein isolate)	ترکیبات به‌دست آمده از دانه سویا	-	خواص مکانیکی ضعیف، حساسیت زیاد به رطوبت، سدگری محدود رطوبت، ضرورت وجود نرم‌کننده برای ساختن فیلم‌ها
پروتئین جداشده آب پنیر (whey protein isolate)	ضایعات صنعت پنیر	سدگری مناسب اکسیژن و مواد بودار	حساسیت زیاد به رطوبت، شکنندگی
گلوتن	ضایعات صنعت نشاسته گندم	قیمت اندک، سدگری مناسب اکسیژن، خواص تشکیل فیلم مطلوب	حساسیت زیاد به آب

خاصیت سدکنندگی ضعیفی در برابر بخار آب دارند. این موضوع سبب محدود شدن پایداری بلندمدت و تضعیف خواص مکانیکی فیلم‌های زیست‌پلیمری (حساسیت به مقدار رطوبت) می‌شود. از دیگر معایب فیلم‌های یاد شده فرایندپذیری ضعیف، تردی و آسیب‌پذیر بودن در برابر تجزیه است. در نهایت، شکنندگی، سفتی، مقاومت کم به ضربه و ناپایداری گرمایی عواملی هستند که استفاده از زیست‌پلیمرها را به‌عنوان ماده بسته‌بندی محدود می‌کنند. به‌طور کلی، بسته‌بندی‌های بر پایه پروتئین و کربوهیدرات‌ها در رطوبت نسبی متوسط سدگرهای مناسبی برای گاز اکسیژن بوده و از خواص مکانیکی مطلوب برخوردارند. اما خاصیت سدگری آن‌ها برای بخار آب به‌دلیل ماهیت آب‌دوستی، ضعیف است. بنابراین، پژوهش‌های گسترده‌ای برای بهبود عملکرد زیست‌پلیمرها انجام یافته است. در ادامه روش‌های بهبود خواص زیست‌پلیمرها توضیح داده می‌شود [۱۵، ۱۴، ۹، ۵].

### روش‌های بهبود خواص زیست‌پلیمرها

#### پوشش‌دهی

به‌طور کلی، پوشش‌دهی فیلم‌های زیستی روش مناسبی برای بهبود

فیزیکی که به زوال در کیفیت مواد غذایی منجر می‌شوند، شامل نرم‌شدگی، سفت‌شدگی، کاهش ظرفیت نگهداری آب، شکستن امولسیون، بادکردگی-چروکیدگی و خرد شدن-شکستن است. از تغییرات فیزیکی ناشی از جذب آب نیز می‌توان به‌وسیله کنترل مهاجرت رطوبت به داخل ماده غذایی جلوگیری کرد. تغییرات فیزیکی و شیمیایی وابسته به هم اتفاق می‌افتند. در نتیجه، با کنترل تغییرات شیمیایی و فساد میکروبی در اثر استفاده از مواد بسته‌بندی زیست‌پلیمری می‌توان به پایداری فیزیکی غذا دست یافت. در جدول ۳ به تغییرات شیمیایی، میکروبی و فیزیکی منجر به فساد غذا و عوامل جلوگیری‌کننده از آن‌ها در بسته‌بندی‌های زیستی اشاره شده است [۱۵، ۱۰، ۵].

#### محدودیت اصلی

استفاده از زیست‌پلیمرها به‌عنوان ماده بسته‌بندی غذایی با محدودیت‌های مختلفی همراه است که کاربرد این فیلم‌ها را محدود می‌کند. شکنندگی، ناپایداری گرمایی، مقاومت ذوب کم، قابلیت دوخت گرمایی دشوار (difficult heat sealability)، تراوایی زیاد بخار آب و اکسیژن از عوامل محدودکننده در استفاده از این فیلم‌ها برای کاربردهای بسته‌بندی غذایی هستند. به‌دلیل ماهیت آب‌دوست زیست‌پلیمرهایی مانند نشاسته و سلولوز، مواد بر پایه این ترکیبات

جدول ۳- خواص زیست پلیمرها برای جلوگیری از فساد مواد غذایی [۱۰].

خواص جلوگیری کننده در بسته بندی	تغییرات فاسدکننده	نوع تغییر
سدگری های اکسیژن، نور و رطوبت	واکنش های قهوه ای شدن (browning)، تندشدگی (rancidity)، تجزیه چربی و تجزیه پروتئین	شیمیایی
سدگری اکسیژن، جذب کننده اکسیژن، سدگری رطوبت، مهاجرت مواد ضد میکروبی از بسته بندی	رشد ریزاندامگان	میکروبی
سدگری رطوبت، کنترل تغییرات شیمیایی و میکروبی، استحکام بسته بندی	تغییر بافتی	فیزیکی

روی سلفون خواص سدگری بخار آب و اکسیژن را بهبود می دهد [۱۹، ۱۴].

#### اختلاط

#### نانوفناوری

نانوفناوری شکل جدیدی از ساخت مواد به وسیله کنترل و دستکاری واحدهای ساختاری آنها در مقیاس نانوست و شامل بهره برداری از خواص و پدیده های نوظهوری است که در مقیاس نانو توسعه یافته اند. به طور کلی، نانوفناوری به عنوان ساخت و به کارگیری ساختارهایی با حداقل یک بعد در مقیاس نانومتر تعریف می شوند. نانوپرکننده به ماده ای گفته می شود که ابعادی بین ۱-۱۰۰ nm داشته باشد. اولین اثر کاهش اندازه مواد، افزایش سطح است. افزایش نسبت سطح به حجم نانوپرکننده ها موجب می شود، اتم های واقع در سطح نسبت به اتم های درون حجم، اثر بسیار بیشتری را بر خواص فیزیکی آنها داشته باشد. این ویژگی، واکنش پذیری نانوپرکننده ها را به شدت افزایش می دهد. افزون بر این، افزایش سطح نانوپرکننده ها، فشار سطحی را تغییر می دهد و به تغییر فاصله بین نانوپرکننده ها یا میان اتم های آنها منجر می شود. تغییر در فاصله بین اتم ها و نسبت سطح به حجم زیاد در پرکننده ها اثر متقابلی را بر خواص ماده به جا می گذارد [۲۲-۲۰]. به منظور دستیابی به اصلاحات با کمک نانوذرات، لازم است واکنش مطلوبی میان ماده زمینه پلیمری (فاز پیوسته) و نانوپرکننده (فاز ناپیوسته) اتفاق افتد. تقویت کننده (پرکننده) های کامپوزیت ها می توانند به شکل الیاف یا ذره باشند. در حقیقت، هنگامی که ذرات یا الیاف در ماده زمینه توزیع می شوند، نیروی اعمال شده به ماده زمینه به طور یکنواخت به ذرات یا الیاف منتقل می شود و خواصی مانند استحکام، سختی، خواص تریبولوژی و تخلخل تغییر می کند.

خواص این فیلم هاست. پوشش دهی عبارت از به کار بردن لایه نازک اضافی از مواد دیگر روی فیلم های زیستی است. بدین ترتیب، می توان خواص سدگری مانند تراوایی اکسیژن، بخار آب و روغن و خواص مکانیکی از جمله مقاومت به کشش و کشسانی را بهبود داد. برای این کار، می توان از انواع مختلف پوشش های زیستی و غیرزیستی بهره برد [۱۴، ۵].

پژوهش های گوناگون نشان داده است، پوشش دهی پلی لاکتیک اسید با PCL-Si/SiOx، PLA-Si/SiOx یا PEO-Si/SiOx خواص سدگری (اکسیژن، بخار آب) آن را بهبود می بخشد. در نتیجه، فیلم های پلی لاکتیک اسید در کنار بسته بندی با جو اصلاح شده (modified atmosphere packaging, MAP) می توانند برای بسته بندی محصولات دارای عمر نگهداری متوسط (مانند انواع پنیرها، سبزیجات و گوشت ماهی) به کار روند [۱۶، ۱۴]. همچنین، پوشش نازکی از AIOx به طور چشمگیری خواص سدگری اکسیژن و بخار آب را در بسیاری از پلیمرها بهبود می بخشد. چنانچه کاغذهای مقوایی پوشش یافته با پلی لاکتیک اسید به وسیله AIOx پوشش داده شوند، عبور اکسیژن از آنها کاهش درخور توجهی می یابد (از ۴۲۰ به ۱۲ cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/10<sup>5</sup> Pa/day و از ۴۰۰ به ۲ cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/10<sup>5</sup> Pa/day به ترتیب برای مقوای ۳۱۰ و ۲۱۰ g/m<sup>2</sup>). در این شرایط سرعت عبور بخار آب نیز به ترتیب از ۶۵ به ۱ g/m<sup>2</sup>/day و از ۷۵ به ۱ g/m<sup>2</sup>/day کاهش می یابد [۱۷، ۱۴].

در پژوهشی دیگر با پوشش دهی فیلم های جدا شده پروتئین سویا با پلی لاکتیک اسید استحکام کششی از ۲/۸ MPa تا حدود ۱۷/۴ MPa و ازدیاد طول از ۱۶۵/۷٪ تا حدود ۲۰۳/۴٪ افزایش یافت [۱۸، ۱۴]. همچنین، پوشش دهی فیلم های سلولوزی استیل دار شده با پلی هیدروکسی بوتیرات به تراوایی کمتر و مدول کشسانی و استحکام کششی بیشتر منجر می شود. پوشش دهی نیتروسولولوز



در اثر ادغام نشاسته اصلاح شده به وسیله اپی کلروهیدرین در پلی اتیلن خطی کم‌چگالی (LLDPE) در مقایسه با نشاسته معمولی، استحکام کششی و کشیدگی بیشتر گزارش شد. نشاسته دارای اتصالات عرضی در مقایسه با نشاسته معمولی، به دلیل زنجیر کربنی بیشتر، آب‌گریزتر است. این موضوع سبب سازگاری بیشتر نشاسته با پلی اتیلن خطی کم‌چگالی می‌شود [۱۴،۲۸].

### نتیجه‌گیری

پلیمرهای متداول امروزی از نفت خام ساخته می‌شوند. با توجه به محدود بودن منابع نفتی لازم است، این پلیمرها به تدریج با زیست‌پلیمرهای به دست آمده از منابع تجدیدپذیر جایگزین شوند. گسترش زیست‌پلیمرها به تازگی آغاز شده است و به چند دلیل اهمیت دارد. نخست، زیست‌پلیمرها برخلاف پلیمرهای به دست آمده از مواد نفتی، قابلیت بازگشت‌پذیری به محیط زیست را دارند و آلاینده محیط زیست به شمار نمی‌آیند. دوم، این مواد به وسیله موجودات زنده ساخته می‌شوند، بنابراین، در چرخه ساخت و تجزیه مواد زیستی قرار می‌گیرند. از این رو، هیچ‌گاه منابع آن‌ها محدود و پایان‌یافتنی نیست. این درحالی است که مواد پلیمری و پلاستیک‌های امروزی از سوخت‌های فسیلی ساخته می‌شوند که ماده اولیه آن‌ها محدود و پایان‌پذیر است. دلیل سوم، اقتصادی بودن زیست‌پلیمرهاست، زیرا تولید زیست‌پلیمر به کارخانه و صنعت چندان پیشرفته نیاز ندارد و با کمترین امکانات می‌توان به تولید آن مبادرت ورزید. همچنین، زیست‌پلیمرها خواصی به نسبت مشابه پلیمرهای نفتی از خود نشان می‌دهند و می‌توان آن‌ها را به عنوان جایگزین مناسب پلاستیک‌های نفتی در صنعت بسته‌بندی غذا استفاده کرد. در کنار این مزایا، استفاده از زیست‌پلیمرها به عنوان مواد بسته‌بندی به دلیل بعضی کاستی‌ها محدود شده است. امروزه، بخش درخور توجهی از این محدودیت‌ها با استفاده از روش‌های مختلف از جمله اصلاح فیزیکی و شیمیایی، پوشش‌دهی و نانوفناوری برطرف شده است.

### مراجع

1. Mirnezamizabary S., *Principles of Food Packaging (Persian)*, Aeej, Tehran, 5-198, 2014.
2. Sung S., Sin L., Tee T., Bee S., Tan A., and Vikhrman M., Antimicrobial Agents For Food Packaging Applications, *Trends*

این ساختارها نانوکامپوزیت نامیده می‌شوند و می‌توانند خواص اصلاح شده یا خواص جدیدی از مواد را نشان دهند. افزون بر این، اجزای نانوکامپوزیت‌ها به سبب برهم‌کنش سطحی میان ماده زمینه و مواد پرکننده از خواص بهتری برخوردار می‌شوند. نوع و مقدار این برهم‌کنش‌ها نقش مهمی بر خواص مختلف نانوکامپوزیت‌ها از جمله خواص فیزیکی مانند پایداری گرمایی، شفافیت، انحلال‌پذیری و خواص نوری، الکتریکی و مکانیکی آن‌ها دارد [۲۲،۲۳].

### اصلاح فیزیکی و شیمیایی

روش دیگر بهبود عملکرد زیست‌پلیمرها، اصلاح فیزیکی و شیمیایی است. اصلاح می‌تواند افزون بر داشتن اثر مثبت بر خواص مکانیکی و تراوایی بخار آب، ابزاری برای افزایش سازگاری بین دو پلیمر باشد [۱۴]. به طور معمول، فیلم‌های نشاسته با هدف بهبود ویژگی آب‌گریزی و سازگاری با مواد آب‌گریز اصلاح می‌شوند. تراوایی بخار آب در فیلم‌های نشاسته با افزودن سیتریک اسید کاهش می‌یابد به گونه‌ای که،  $10\%w/w$  سیتریک اسید، بیشترین کاهش را در مقدار تراوایی نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند با ساختار چندکربوکسیلی سیتریک اسید توضیح داده شود. این گروه‌ها می‌توانند با گروه هیدروکسیل نشاسته واکنش دهند. بدین ترتیب، گروه‌های هیدروکسیل در دسترس کاهش یافته و پیوندهای هیدروژنی قوی تشکیل می‌شود که از سفتی و تبلور جلوگیری می‌کند. همچنین، سیتریک اسید می‌تواند به عنوان ماده اتصال‌دهنده عرضی به کار رود و خواص مکانیکی را بهبود دهد [۱۴،۲۴،۲۵].

تراوایی اکسیژن و آب‌گریزی فیلم‌های سلولوزی میکروورشته‌ای می‌تواند به وسیله استیل‌دار شدن با استیک اسید بدون آب بهبود یابد. فیلم‌های نشاسته مقاوم به آب و انعطاف‌پذیر را می‌توان با گرمادادن نشاسته ژلاتینی شده در تعلیقی بدون آب با لیتیم کلرید و در مجاورت حلال آلی تولید کرد [۱۴،۲۶].

اصلاح شیمیایی سلولوز استات به وسیله ایجاد اتصال عرضی با تری‌سدیم و تری‌متافسفات به ایجاد موادی با خواص مکانیکی بهبود یافته (استحکام کششی بیشتر) منجر می‌شود. این پدیده با اتصال عرضی برخی گروه‌های هیدروکسیلی موجود در سلولوز استات، توضیح داده می‌شود [۱۴،۲۷].

- Food Sci. Technol.*, **33**, 110-123, 2013.
3. Marsh K. and Bugusu B., Food Packaging—Roles, Materials, and Environmental Issue, *J. Food Sci.*, **3**, 39-55, 2007.
  4. Azarion F., *Packaging (Persian)*, Azarion, Tehran, 20-50, 2004.
  5. Alavi S., Thomas S., Sandeep K.P., Kalarikkal N., Varghese J., and Yaragalla S., *Polymers for Packaging Application*, Apple Academic, Toronto, 153-235, 2015.
  6. Siracusa V., Rocculi P., Romani S., and Rosa M.D., Biodegradable Polymers for Food Packaging, *Trends Food Sci. Technol.*, **19**, 634-643, 2008.
  7. Galic K., Sctetar M., and Kurek M., The Benefits of Processing and Packaging, *Trends Food Sci. Technol.*, **22**, 127-137, 2011.
  8. Zhao R., Torley P., and Halley P., Emerging Biodegradable Materials: Starch and Protein Based Bio-nanocomposites, *J. Mater. Sci.*, **43**, 3058-3071, 2008.
  9. Rhim J.W., Park H.M., and Ha C.S., Bio-Nanocomposites for Food Packaging Applications, *Prog. Polym. Sci.*, **38**, 1629-1652, 2013.
  10. Weber C.J., *Biobased Packaging Materials for the Food Industry*, The Royal Veterinary and Agriculture University Røghedsvej, Denmark, 13-47, 2000.
  11. Wanger C., Bioplastics, <http://www.foodpackagingforum.org/food-packaging-health/bioplastics>, available in 11 June, 2014.
  12. Mortazavian A.M., Azizi M.H., and Sohrabvandi S., Edible Films: Qualitative Parameters and Production Methods, *Iran. J. Food Sci. Technol.*, **4**, 107-117, 2011.
  13. Muppalla S., Kanatt S., Chawla A., and Sharma A., Carboxymethyl Cellulose-Polyvinyl Alcohol Films with Clove Oil for Active Packaging of Ground Chicken Meat, *Food. Packag. Shelf Life*, **2**, 51-58, 2014.
  14. Peelman N., Ragaert P., Meulenaer B.D., Cardon L., and Devliegher F., Application of Bioplastics for Food Packaging, *Trends Food Sci. Technol.*, **32**, 128-141, 2013.
  15. Petersen K., Bertelsen G., Lawther M., and Mortensen G., Potential of Biobased Materials for Food Packaging, *Trends Food Sci. Technol.*, **10**, 52-68, 1999.
  16. Lunt J., The Development and Commercialization of Poly(hydroxy alkanoates) (PHA), *Bioplastics*, **3**, 36-38, 2009.
  17. Hirvikorpi T., Vähä-Nissi M., Nikkola J., Harlin A., and Karpinen M., Thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Barrier Coatings onto Temperature-Sensitive Packaging Materials by Atomic Layer Deposition, *Surf. Coat. Technol.*, **205**, 5088-5092, 2011.
  18. Rhim J.W., Lee J.H., and Perry K., Mechanical and Barrier Properties of Biodegradable Soy Protein Isolate-Based Films Coated with Polylactic Acid, *Trends Food Sci. Technol.*, **40**, 232-238, 2007.
  19. Cyras V.P., Commisso M.S., Mauri A.N., and Vázquez A., Biodegradable Double-Layer Films Based on Biological Resources: Polyhydroxybutyrate and Cellulose, *J. Appl. Polym. Sci.*, **106**, 749-756, 2007.
  20. Karimzadeh F., Ghasemali E., and Saleemizadeh E., *Nanomaterials: Properties, Synthesis and Application (Persian)*, Jahad Daneshgahi Isfahan University of Technology, Isfahan, 155-200, 2005.
  21. Lagaron J.M. and Lopez A., Nanotechnology for Bioplastics: Opportunities, Challenges and Strategies, *Trends Food Sci. Technol.*, **22**, 611-617, 2011.
  22. Duncan T.V., Applications of Nanotechnology in Food Packaging and Food Safety: Barrier Materials, Antimicrobials and Sensors, *J. Colloid Interface Sci.*, **363**, 1-24, 2011.
  23. Farhoodi M., Nanocomposite Materials for Food Packaging Applications: Characterization and Safety Evaluation, *Food Eng. Rev.*, **8**, 35-51, 2016.
  24. Ghanbarzadeh B., Almasi H., and Entezami A.A., Improving the Barrier and Mechanical Properties of Corn Starch-Based Edible Films: Effect of Citric Acid and Carboxymethyl Cellulose, *Ind. Crops Prod.*, **33**, 229-235, 2011.
  25. Shi R., Bi J., Zhang Z., Zhu A., Chen D., Zhou X., Zhang L., and Wei W., The Effect of Citric Acid on the Structural Properties and Cytotoxicity of the Polyvinyl Alcohol/Starch Films When Molding at High Temperature, *Carbohydr. Polym.*, **74**, 763-770, 2008.
  26. Rodionova G., Lenés M., Eriksen O., and Gregersen O., Surface Chemical Modification of Microfibrillated Cellulose: Improvement of Barrier Properties for Packaging Applications, *Cellulose*, **18**, 127-134, 2011.
  27. Demirgöz D., Elvira C., Mano J.F., Cunha A., Piskin E., and Reis R.L., Chemical Modification of Starch Based Biodegradable Polymeric Blends: Effects on Water Uptake, Degradation Behaviour and Mechanical Properties, *Polym. Degrad. Stabil.*, **70**, 161-170, 2000.
  28. Kim M. and Lee S.J., Characteristics of Cross-Linked Potato Starch and Starch-Filled Linear Low-Density Polyethylene Films, *Carbohydr. Polym.*, **50**, 331-337, 2002.