



## کاربرد تیمار سطحی پلاسما به منظور تولید فیلم نانوکامپوزیت دو لایه پلی اتیلن ترفتالات-کربوکسی

متیل سلولز حاوی نانو ذرات اکسیدروی به عنوان نوعی بسته بندی جدید برای مواد غذایی

سیده لیلا نصیری<sup>۱</sup>، محمد حسین عزیزی<sup>۲\*</sup>، فرناز موحدی<sup>۳</sup>، ناهید رحیمی فرد<sup>۴</sup>، حمید توکلی پور<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد، دکتری علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار، دکتری شیمی آلی، گروه پژوهشی سلولزی و بسته بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران

۴- دانشیار، دکتری میکروبیولوژی، آزمایشگاه کنترل غذا و دارو، وزارت بهداشت و آموزش پزشکی، تهران، ایران.

۵- استاد، دکتری علوم و صنایع غذایی، گروه صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد سبزوار، سبزوار، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

در این پژوهش فیلم های نانوکامپوزیتی پلی اتیلن ترفتالات- کربوکسی متیل سلولز (PET-CMC) حاوی نانوذرات اکسید روی (ZnO NPs: ۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪) تهیه شد و در نهایت فیلم های نانوکامپوزیتی تهیه شده تحت آزمون های نفوذپذیری بخار آب، رطوبت، مکانیکی و میکروبی قرار گرفت. برای اتصال بهتر کربوکسی متیل سلولز (CMC) روی سطح فیلم پلی اتیلن ترفتالات (PET)، از پیش تیمار پلاسماي اکسیژن استفاده شد. همچنین به منظور بررسی اثر تیمار پلاسما در بهبود ویژگی های فیلم های دو لایه، مقایسه بین فیلم های دو لایه ی تیمار شده با پلاسما و تیمار نشده، با استفاده از آزمون FTIR صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که گروه های قطبی مانند C=O و OH در سطح PET پس از تیمار با پلاسما تشکیل شد که باعث بهبود چسبیدن دو لایه ی پلیمر به یکدیگر گردید. با افزودن نانوذرات، نفوذپذیری بخار آب فیلم دو لایه PET-CMC-ZnO نسبت به فیلم PET-CMC کاهش پیدا کرد. در آزمون مکانیکی با افزودن نانوذرات در فیلم های نانوکامپوزیتی نسبت به فیلم PET-CMC بر میزان استحکام کششی فیلم ها از ۱۲۳/۷۷ به ۴۶۶/۸۰ MPa افزوده شد و مقاومت بیشتری نشان دادند. در حالی که طول کشش هنگام شکست، با افزایش درصد نانوذرات در فیلم های نانوکامپوزیت از ۴۸/۳۸٪ به ۱۰/۵۹٪ کاهش یافت. بنابراین فیلم های نانوکامپوزیت در مقایسه با فیلم PET-CMC مقاومت بیشتری نشان می دهند که کمک به تسهیل حمل و نقل و ذخیره مواد غذایی می کنند. حضور نانوذرات اکسیدروی در فیلم PET-CMC فعالیت ضد میکروبی در برابر اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس نشان داد. به طور کلی افزایش نانو ذرات ZnO باعث بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و میکروبی می شود. یافته های این مطالعه نشان داد که فیلم های PET/CMC تحت تیمار پلاسما، قابلیت استفاده در بسته بندی های ضد میکروبی مواد غذایی را دارند و می توانند ماندگاری مواد غذایی بسته بندی شده را به عنوان بسته بندی فعال افزایش دهند.

کلمات کلیدی:

فیلم نانوکامپوزیت،

نانوذرات ZnO،

پلاسماي سرد،

خواص میکروبی،

خواص مکانیکی

DOI: 10.52547/fsct.18.120.19

DOR: 20.1001.1.20088787.1400.18.120.28.0

\* مسئول مکاتبات:

azizit\_m@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

امروزه صنعت غذا جزء بیشترین مصرف کنندگان مواد پلاستیکی بر پایه مشتقات نفتی است. فرآیند تجزیه ی این مواد بسیار کند بوده و آلاینده ی شدید محیط زیست می باشد و به این دلیل باعث آسیب به محیط زیست شده اند [۱، ۲]. بنابراین توسعه مواد طبیعی و سازگار با محیط زیست می تواند جایگزین خوبی باشد و مشکلات زیست محیطی ناشی از پلاستیک های سنتزی را برطرف کند. به همین دلیل توجه زیادی به تحقیقات برای تولید مواد بسته بندی بر پایه بیوپلیمرها و مواد زیست تخریب پذیر<sup>۱</sup> شده است. استفاده از بیوپلیمرهای زیست تخریب پذیر مزایای زیادی مانند تجزیه پذیری، امکان تولید از ضایعات و سازگاری با محیط زیست را دارد و سبب صرفه جویی در هزینه ها و بهره برداری از منابع مختلف می شود. فیلمهای خوراکی در مقایسه با پلیمرهای سنتزی می توانند با ویژگیهای خود مانند عبور انتخابی آب و اکسیژن، کاهش از دست رفتن بوی غذا و اکسیداسیون چربیها، کیفیت غذا و مدت زمان نگهداری آن را افزایش دهند. فیلمهای خوراکی تهیه شده برای میوه و سبزیجات به عنوان تنظیم کننده میزان انتقال رطوبت، اکسیژن، دی اکسید کربن، عطر و طعم ترکیبات موجود در سیستمهای غذایی می توانند با ایجاد یک مانع نیمه نفوذپذیر در برابر گازها و بخار آب منجر به کاهش تنفس، قهوه ای شدن آنزیمی و کم آبی شوند و زمان ماندگاری و کیفیت محصول را افزایش دهند [۱، ۳].

یکی از پرکاربردترین بیوپلیمرها، فیلم کربوکسی متیل سلولز<sup>۲</sup> (CMC) است. کربوکسی متیل سلولز، یکی از مشتقات سلولزی می باشد که دارای فعالیت سطحی، خواص ترموپلاستیکی، قوام دهندگی می باشد و در برابر هیدرولیز و گرما و اکسایش پایدار است [۴]. کربوکسی متیل سلولز بدلیل ارزان بودن و در دسترس بودن یکی از پراهمیت ترین پلیمرهای زیست تخریب پذیر می باشد. به دلیل وزن مولکولی بالا و ساختار پلیمری، می توان از آن به عنوان پرکننده در فیلمهای بیوکامپوزیت استفاده کرد. اما متأسفانه برخی محدودیت ها از قبیل خواص مکانیکی ضعیف، نفوذپذیری زیاد بخار آب در مقایسه با پلیمرهای حاصل از مشتقات نفتی

دارند [۵، ۶]. پلی اتیلن ترفتالات<sup>۳</sup> (PET) یک ماده بسته بندی پلاستیکی است که دارای کاربرد فراوان در صنایع غذایی است. ماهیت خنثی بودن این ترکیب از نظر شیمیایی همراه با دیگر خواص فیزیکی، این ماده را برای بسته بندی مواد غذایی بسیار مناسب ساخته است [۷]. به علت خواص خوب ممانعت کنندگی در برابر اکسیژن، رطوبت و دی اکسید کربن، مهاجرت بسیار کم مونومرها و بازیافت مطلوب بسته ها پس از مصرف، به یک ماده اصلی برای بسته بندی مواد غذایی تبدیل شده است [۸].

اگرچه بسته بندی های زیستی حاصل از بیوپلیمرهای خالص دارای زیست تخریب پذیری بالاتری نسبت به فیلم های ترکیبی هستند، ولی کیفیت مکانیکی این بسته های زیستی پایین و نفوذ پذیری آنها بالا است. بدین ترتیب با ترکیب این دو نوع پلیمر می توان از مزیت های هر دو دسته بهره مند گردید. زمانی که بیوپلیمر به عنوان پلیمر پایه استفاده می شود، از پلیمرهای سنتزی به منظور بهبود خواص بازدارندگی و خواص مکانیکی فیلم ها استفاده می شود [۹]. عملکرد محافظتی این فیلم ها ممکن است با افزودن ترکیبات ضد میکروبی، آنتی اکسیدان ها، ادویه جات و مواد مغذی افزایش یابد. فیلم های حاصل از نانومواد و بیوپلیمرها یا به اصطلاح نانوبیوکامپوزیت ها خواص کاربردی مطلوبتری از خود نشان می دهند. بهبود خصوصیات مکانیکی و بازدارندگی، افزایش خاصیت ضد میکروبی از جمله این خصوصیات می باشند [۱۰، ۳].

استفاده از نانوتکنولوژی در بسته بندی مواد غذایی می تواند ویژگیهای کاربردی پلیمرها را تقویت و معایب آنها را به حداقل برساند. بنابراین یکی از روش های جدید استفاده از فیلم های فعال حاوی نانوذرات است [۱۱]. از ترکیبات ضد میکروبی مورد استفاده در بسته بندی مواد غذایی که جزء اکسیدهای فلزی به شمار می روند، نانوذرات اکسید روی می باشد. نانوذرات اکسیدروی خاصیت ضد میکروبی داشته و مزیت هایی همچون قیمت ارزان، ظاهر سفید و مقاومت به اشعه فرابنفش دارد. آنها همچنین کاربردهای بسیار متنوعی داشته و می توانند روی مواد معدنی مانند هیدروکسید آپاتیت بارگذاری شده و فعالیت ضد میکروبی بر علیه انواع باکتریها نشان دهند [۱۲]. پلاسمای سرد یک تکنیک غیر گرمایی است

1. Biodegradable  
2. Carboxymethyl cellulose

3. Polyethylene terephthalate

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- مواد

پودر کربوکسی متیل سلولز از شرکت فرآیندسازان آرین و نانو ذرات اکسید روی از شرکت تحقیقات نانو مواد (هیوستون، آمریکا) خریداری شدند. فیلم پلی اتیلن ترفتالات از شرکت بسپار اصفهان تهیه شد. سایر مواد شیمیایی در این تحقیق از شرکت مرک (دارمشتات، آلمان) خریداری شدند.

### ۲-۲- تیمار سطحی فیلم پلی اتیلن ترفتالات با

#### دستگاه پلاسما

ابتدا نمونه های فیلم پلی اتیلن ترفتالات (LF0200, MFI 2) در ابعاد  $30 \times 20$  سانتی متر برش داده شدند. سپس سطح آنها با پنبه آغشته به الکل تمیز گردید و پس از خشک شدن کامل، فیلم های سنتزی به کمک دستگاه پلاسمای اتمسفری (پلاسمای گلاپد آرک، مدل GAP-500 شرکت ساتبا، ساخت ایران) با ولتاژ بالا (به منظور ایجاد پلاسمای یکنواخت تر) برای مدت حدود ۱۰ ثانیه تیمار شدند. این دستگاه از نوع غلتکی (roll to roll plasma treatment) درای ابعاد کلی  $110 \times 3030$  سانتی متر بود. طول غلتک ۸۰ سانتی متر و فاصله ی غلتک ها ۲ میلیمتر می باشد که در آن هر غلتک دارای ۴ الکتروود از جنس استیل و قطر ۴ میلیمتر بوده و توانی برابر با ۳ کیلو وات داشت. در این نوع پلاسمای اتمسفری، از ترکیب طبیعی گازهای جو برای ایجاد گروه های فعال آلدوست در سطح پلیمر استفاده می شود. فیلم ها بر روی غلتک دستگاه قرار گرفتند و بعد از روشن کردن دستگاه، با سرعت ثابتی از روی غلتک عبور داده شدند. فیلم ها حدود ۲ دقیقه در معرض هوا قرار گرفتند تا رادیکال های آزاد تشکیل شده روی سطح فیلم، با مولکول های هوا واکنش دهند و تشکیل گروه های عاملی فعال دهند. سپس فیلم های تیمار شده، داخل پوشش های در بسته قرار گرفتند و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند [۱۸].

### ۲-۳- تهیه فیلم نانو بیوکامپوزیت

#### پلی اتیلن-کربوکسی متیل سلولز

برای تهیه فیلم از روش قالب ریزی<sup>۵</sup> استفاده شد. نانو ذرات اکسید روی در مقادیر مناسب برداشته شد و در ۱۵۰ میلی لیتر

که در آینده به عنوان چهارمین حالت ماده شامل رادیکالها، الکترونها، یونهای باردار، ذرات خنثی یا برانگیخته شده، مولکولها، اتمها و فوتونهای UV همراه با غیرفعال شدن خواص میکروارگانسیم ها در نظر گرفته خواهد شد [۱۳]. در صنایع غذایی، پلاسمای سرد نتایج دلخواه برای تصفیه مواد غذایی و سم زدایی، استریلیزاسیون تجهیزات، تصفیه هوا، تصفیه فاضلاب و پردازش مواد بسته بندی نشان داده است [۱۴].

مطابق با مطالعات انجام شده برای بررسی اثرات ضد میکروبی فیلمهای خوراکی بر پایه کربوکسی متیل سلولز حاوی سوربات پتاسیم بر روی گونه های مختلف اسپرژیلوس<sup>۴</sup> مشخص شد در نمونه های پوشش داده شده، رشد کپک مشاهده نمی شود [۱۵]. همچنین با بررسی اثرات ضد میکروبی فیلم های نانوکامپوزیتی بیوپلیمرهای مختلف مانند آگار، کاراگینان و CMC حاوی نانوذرات روی نشان داده شد نانوذرات اکسید روی بکار رفته در فیلم، رشد میکروب ها را مهار می کند [۱۶]. همچنین با بررسی تکنیک پلاسمای سرد در بسته بندی مواد غذایی بیان شد که فناوری پلاسمای سرد را می توان برای اصلاح نقاط ضعف ترکیبات پلیمر مورد استفاده قرار داد [۱۴]. همچنین بررسی ویژگی های ساختاری فیلم های بیونانوکامپوزیتی نانوکریستال سلولز/نقره/آلژینات نشان داد که از این فیلم های کامپوزیت سازگار با محیط زیست می توان در بسته بندی مواد غذایی استفاده کرد [۱۷].

کاربرد فیلم و پوشش های خوراکی می تواند به عنوان یکی از راههای جلوگیری و کاهش شدت تنفس در میوه جات و در نتیجه افزایش زمان ماندگاری و نگهداری آنها مطرح باشد. همچنین استفاده همزمان از تکنیک پلاسمای سرد به عنوان یک تکنیک غیرحرارتی و نوآورانه، منجر به بهبود خواص چسبندگی دولایه ی ترکیبی در فیلم می گردد و باعث بهبود خواص چندگانه ی فیلم از لحاظ مکانیکی و همچنین ضد میکروبی می شود. بنابراین در این پژوهش از فیلم کربوکسی متیل سلولز- پلی اتیلن ترفتالات به عنوان بیوپلیمرهای تشکیل دهنده فیلم و از نانوذرات اکسید روی به عنوان ماده ضد میکروبی استفاده شد و بعد از تولید فیلم تحت تکنیک پلاسمای سرد، ویژگی های فیزیکی شیمیایی، مکانیکی و ضد میکروبی آن مورد بررسی قرار گرفت.

5. Casting

4. Aspergillus

ASTM, D882-18 با استفاده از دستگاه آزمون مکانیکی Zwich/Roell مدل FRO10 اندازه گیری شد [۲۲].

#### ۲-۴-۶- آزمون های میکروبی

آزمون فعالیت ضد میکروبی فیلم دولایه PET-CMC حاوی غلظت های متفاوت اکسیدروی در برابر سویه های باکتریایی استافیلوکوکوس اورئوس (ATCC 6538P) و اشرشیاکلی (ATCC 8739) براساس استاندارد ISO 22196 انجام شد [۲۳]. به منظور تعیین میزان خاصیت ضد میکروبی فیلم ها، بعد از تهیه محیط های کشت، باکتری های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در مجاورت فیلم های نانویوکامپوزیت قرار داده شد و سپس شمارش باکتری اشرشیاکلی و باکتری استافیلوکوکوس اورئوس انجام شد.

#### ۲-۵- تجزیه و تحلیل آماری

این پژوهش توسط آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. کلیه تیمارها و آزمایش های مختلف سه بار تکرار شدند. داده های به دست آمده با نرم افزار SPSS v.18.0 تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین عوامل مورد بررسی در تولید فیلم شامل مقدار نانو ذرات اکسید روی در غلظت های مختلف (۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد) با استفاده از طرح چند دامنه دانکن و در سطح معنی داری ۵ درصد ارزیابی شدند.

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- اندازه گیری ضخامت فیلم

نتایج اندازه گیری مربوط به ضخامت فیلم های دولایه CMC-PET حاوی درصد های مختلف اکسیدروی در شکل ۱ نشان داده شده است. ضخامت فیلم های دولایه PET-CMC تیمار شده با پلاسما نسبت به فیلم دولایه تیمار نشده کمتر بود اما تفاوت معنی داری بین آنها وجود نداشت ( $p > 0.05$ ). اندازه گیری ضخامت فیلم ها نشان داد که فیلم دولایه تیمار نشده می تواند ضخامت بیشتری نسبت به فیلم PET-CMC پلاسما شده داشته باشد. این موضوع را می توان به چسبندگی بهتر کربوکسی متیل سلولز به فیلم پلی اتیلن ترفتالات پس از تیمار با پلاسما نسبت داد که البته در مقایسه با فیلم دو لایه تیمار نشده ناچیز بوده و تفاوت معنی داری مشاهده نشده است [۱۸].

آب مقطر در ارلن، به مدت بیست دقیقه روی همزن مغناطیسی بصورت مداوم هم زده شد. سپس، در حمام التراسونیک (Falk, 40 and 59 KHz)، به مدت ۶۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت<sup>۶</sup> قرار داده شده و پس از آن، گلیسرول و کربوکسی متیل سلولز به همراه آب مقطر به محلول افزوده شد. از سوی دیگر ورق های پلی اتیلن ترفتالات که قبلاً تحت تیمار با پلاسما سرد آماده شدند، داخل قالب مناسب قرار گرفت و قالب ریزی محلول CMC حاوی نانو ذرات اکسید روی بر روی آنها صورت گرفت. در نهایت فیلم های تولید شده برای خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت در آون ۳۸ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. نمونه فاقد نانو ذرات اکسیدروی به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد [۱۸].

#### ۲-۴-۲- آزمون های بررسی خواص فیلم

##### ۲-۴-۲-۱- اندازه گیری ضخامت فیلم

با استفاده از میکرومتر دیجیتال مدل IP54, China -QLR digit با دقت 0.001mm ضخامت فیلم در سه نقطه متفاوت بصورت تصادفی اندازه گیری و میانگین آن گزارش شد [۱۹].

##### ۲-۴-۲-۲- آزمون FTIR/ATR

آزمون FTIR فیلم ها توسط دستگاه اسپکترومتر FTIR (Thermo Nicolet IR 100 FT-IR) در دامنه  $4000-400\text{cm}^{-1}$  با قدرت تفکیک  $4\text{cm}^{-1}$  انجام گرفت. تمام آزمون ها در دمای اتاق انجام شد [۲۰].

##### ۲-۴-۲-۳- اندازه گیری نفوذ پذیری به بخار آب WVP<sup>۷</sup>

میزان نفوذ پذیری به بخار آب فیلم ها بر اساس ASTM E96(2016) و به روش دسیکانت<sup>۸</sup> تعیین شد [۲۱].

##### ۲-۴-۲-۴- آزمون رطوبت

محتوای رطوبت فیلم ها با اندازه گیری وزن قبل و بعد از نگهداری در آون ۱۱۰ درجه تا رسیدن به وزن ثابت بررسی گردید [۱۸].

##### ۲-۴-۲-۵- بررسی خواص مکانیکی و استحکام فیلم

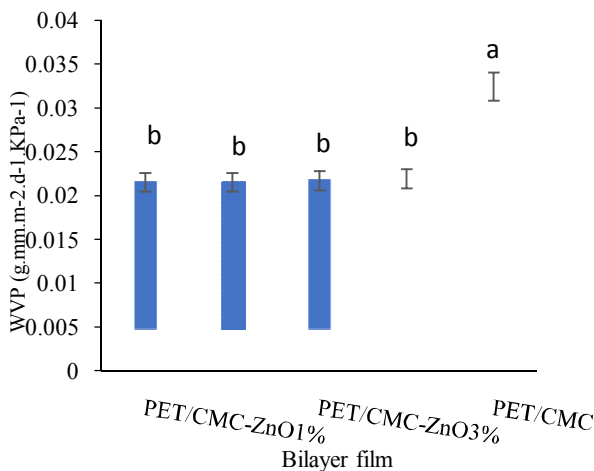
ویژگی های مکانیکی شامل مقاومت به کشش<sup>۹</sup> (TS) و درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی<sup>۱۰</sup> (%E) براساس استاندارد

6. Sonicate  
7. Water vapor permeability  
8. Desiccant Method  
9. Tensile strength (TS)  
10. Elongation at Break (EB)

کفیران-کیتوزان تولید شده با افزودن نانوسلولز را گزارش کردند [۲].

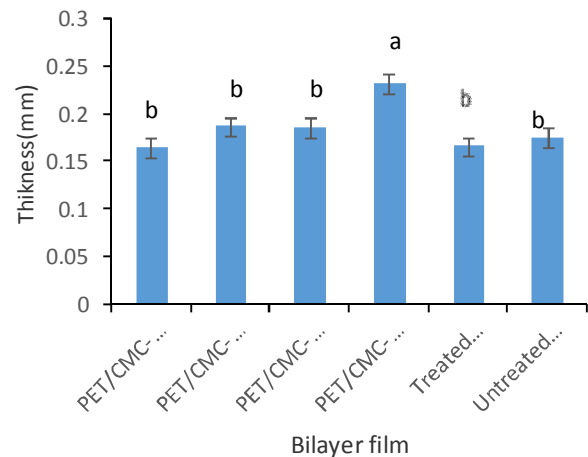
### ۲-۳- نفوذ پذیری به بخار آب WVP

نتایج مربوط به اندازه گیری نفوذ پذیری به بخار آب فیلمهای دولایه CMC-PET حاوی درصدهای مختلف ZnO در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج آماری نشان داده است نفوذپذیری به بخار آب در بین فیلم های حاوی غلظت های مختلف نانوذره تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند ( $p>0.05$ ).



**Fig 2** Effects of different levels of ZnO NPs on the WVP of PET-CMC nanobiocomposite bilayer films. Different letters represent significant difference at 5% level of probability.

با اضافه کردن نانو ذره، میزان نفوذپذیری از حدود 0.32  $\text{gmm/dm}^2\text{KP}$  به حدود 0.22  $\text{gmm/dm}^2\text{KP}$  کاهش پیدا کرد. مقدار آن در نمونه شاهد بصورت معنی داری بالاتر از سایر نمونه ها بود و این نشان دهنده ی بهبود خواص ممانعت کنندگی رطوبت فیلم های تولیدی با اضافه کردن نانو ذره بوده است. کاهش نفوذپذیری می تواند به دلیل استفاده از فیلرهایی باشد که ذاتاً دارای خواص نفوذپذیری پایین تری نسبت به ماتریس پلیمری هستند. همچنین دسپرسیون بالای نانو ذرات می تواند باعث کاهش بیشتر این فاکتور شود [۲۶]. بنابراین یکی از دلایل کاهش نفوذپذیری به بخار آب، ایجاد پیوندهای داخل مولکولی نانو ذرات در داخل پلیمر می باشد. از طرفی قابلیت نانو ذرات برای ایجاد پیوندهایی با گروه های هیدورفیلی فیلم مانند هیدروژن زنجیره باعث می شود که حرکت مولکولهای آب به



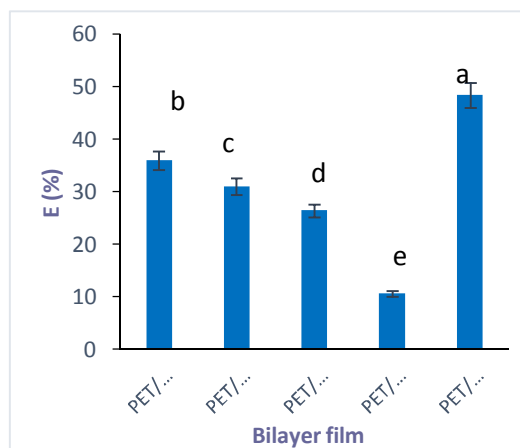
**Fig 1** Thickness of the plasma-treated PET-CMC-ZnO/plasma-treated PET-CMC/untreated PET-CMC nanobiocomposite bilayer films. Different letters represent significant difference at 5% level of probability.

نتیجه ی مشابهی توسط هنرور و همکاران (۲۰۱۷) گزارش شده است. مقایسه میانگین ها در تحقیق کنونی نشان داد که نمونه حاوی ۴٪ نانو ذره دارای بیشترین ضخامت بوده و تفاوت معنی داری با سایر فیلم ها داشته است ( $P<0.05$ ). افزایش ضخامت سایر فیلم های حاوی نانو ذره تفاوت معنی داری با نمونه شاهد نداشت ( $P>0.05$ ). در صورتی که اضافه کردن برخی ترکیبات مثل اسانس های خوراکی باعث افزایش معنی دار ضخامت فیلم های CMC/PP [۱۸]، CMC [۲۴] و فیلم پروتئین سویا/ژلاتین پوست ماهی حاوی اسانس برگ ریحان و نانوذرات اکسید روی [۱۹] شده بود. از طرفی هم افزودن ذرات اکسیدروی به فیلم نشاسته باعث افزایش معنی دار ( $P<0.05$ ) ضخامت فیلم ها شد، طوری که با افزایش غلظت آن، ضخامت بیشتر شده بود [۲۵]. عدم افزایش معنی دار ضخامت فیلم دولایه در غلظتهای کم و متوسط نانو ذره در این تحقیق ممکن است به دلیل آرایش زنجیره های پلی مری فیلم/درجه پلیمریزاسیون و وجود فضای باز در بین واحدهای تشکیل دهنده پلیمر باشد، بصورتی که ذرات بدون اینکه تاثیری بر اندازه پلیمرها داشته باشند، در بین زنجیره های آن ها قرار گیرند. نتیجه مشابه توسط کنمانی و همکاران (۲۰۱۴) مشاهده شد که گزارش افزایش ضخامت فیلمهای تولید شده بیوپلیمری آگار، کاراگینان و کربوکسی متیل سلولز با افزودن نانوذرات اکسیدروی را داد [۱۶]. همچنین سلمانیان و همکاران (۲۰۱۹) افزایش اندکی در ضخامت فیلم مخلوط

نتایج نشان داد مقدار رطوبت فیلم نمونه شاهد، با نمونه فیلم حاوی ۱٪ نانو ذره تفاوت معنی داری نداشت ( $p > 0.05$ ) ولی با سایر فیلم ها تفاوت معنی دار بود ( $p < 0.05$ ). اضافه کردن اسانس [۲۴] و نانو ذرات اکسیدروی [۲۵، ۲۸، ۳۱] باعث کاهش مقدار رطوبت در فیلم های مشابه گردیده است. همچنین در تحقیق مشابه دیگری مشاهده شد که در فیلم پروتئین سویا، مقدار رطوبت با افزودن نانوذرات مونت موریلونیت کاهش یافت [۳۲]. یک مطالعه مشابه دیگر نشان داد که افزودن اسانس دارچین و نانوذرات  $TiO_2$  به فیلم های نشاسته ساگو، میزان رطوبت را کاهش می دهد [۳۰].

### ۳-۴- خواص مکانیکی

در این تحقیق اثر افزودن نانوذرات اکسید روی بر روی فیلم دولایه PET-CMC بررسی گردید. بنابراین دو آزمون مکانیکی شامل TS (استحکام کششی) و E (ازدیاد طول تا نقطه پارگی) برای آگاهی از میزان پایداری فیلم ها در هنگام بسته بندی انجام داده شد که نتایج آن در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری در بین نمونه های حاوی نانوذره و شاهد برای هر دو فاکتور وجود داشت ( $P < 0.05$ ). در این تحقیق میزان TS و E با اضافه کردن مقدار نانوذرات به ترتیب از حدود ۱۲۴MPa و ۴۸٪ به ۲۶۰MPa و ۳۶٪ رسید. همچنین نشان داده شد که با افزایش غلظت نانو ذره میزان TS و E به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کرده است.

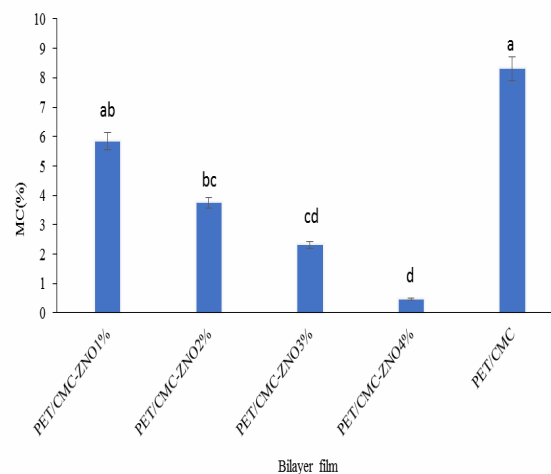


**Fig 4** Effects of different levels of ZnO NPs on elongation at break of the PET-CMC bilayer films. Different letters represent significant difference at 5% level of probability.

سختی انجام گیرد [۲۷]. نتایج مشابهی توسط سایر محققین به علت کاهش خاصیت آبریزی فیلم با افزودن نانوذرات اکسیدروی بدست آمده است [۲۸]. جعفرزاده و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند که افزودن نانوذرات اکسیدروی به فیلم سمولینا بطور چشمگیری باعث کاهش نفوذپذیری نسبت به بخار آب گردید که بعلا پیوندهای هیدروژنی تشکیل شده بین ماتریس فیلم سمولینا و ذرات نانو می باشد [۲۹]. کنمانی و همکاران (۲۰۱۴) علت کاهش نفوذپذیری نسبت به بخار آب در فیلم های آگار حاوی نانو ذرات روی را ایجاد مسیرهای زیگزاگی و پر پیچ وخم بیان نموده اند [۱۶]. سایر مطالعات مشابه گزارش کرد که افزودن نانو  $ZnO$  به فیلم پلی ساکاریدی سویا [۲۹] و همچنین نانو ذرات  $TiO_2$  به فیلم های نشاسته ساگو [۳۰] نفوذپذیری نسبت به بخار آب را کاهش می دهد.

### ۳-۳- میزان رطوبت

نتایج اندازه گیری مربوط به میزان رطوبت فیلمهای دولایه CMC-PET حاوی درصدهای مختلف  $ZnO$  در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس این نتایج، مشخص شد که با افزایش غلظت نانو ذرات میزان محتوی رطوبت کاهش پیدا کرده و از حدود ۵/۸۳٪ به حدود ۰/۴۷٪ تنزل یافت. کمترین مقدار رطوبت متعلق به فیلم دولایه حاوی ۴٪ نانو ذره اکسیدروی بود.



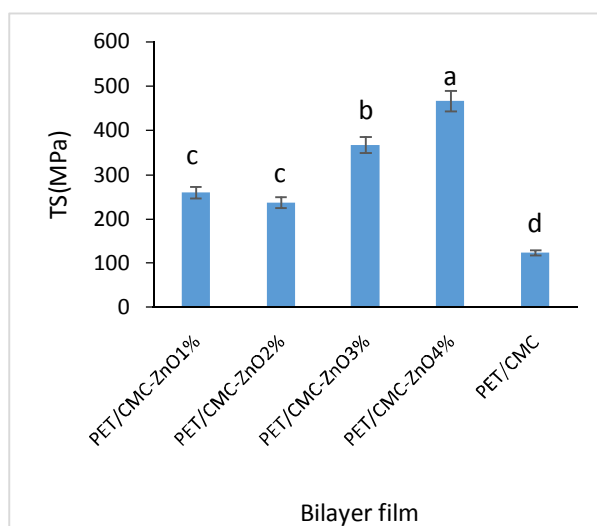
**Fig 3** Effects of different levels of ZnO NPs on the moisture content of the PET-CMC bilayer films. Different letters represent significant difference at 5% level of probability.

شده که ایجاد اتصالات عرضی در زنجیره پلیمر می کند و چسبندگی داخلی بین ماتریس و پرکننده ها بواسطه ی پیوندهای هیدروژنی بوجود می آید [۲۸]. همچنین در سایر مطالعات، عملکرد مشابهی توسط دیگر نانوذرات گزارش شده است [۳۱، ۳۴].

### FTIR/ATR -۵-۳

اثرات تیمار پلاسما در گروه های شیمیایی سطح PET توسط آزمون FTIR/ATR تعیین گردید. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود ارتعاشات کششی در فیلم تحت تیمار پلاسما سرد دارای پیک تیزتر بوده که به دلیل تشکیل گروه های کربونیلی جدید است. به صورت کلی در اثر تیمار پلاسما سرد، پیک های در حوالی  $900\text{ cm}^{-1}$  و  $1375\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش خمشی گروه های OH و در حوالی  $1650\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی گروه C=O است که بیانگر گروه های قطبی هستند و پیک ها تیز تر و دارای شدت بیشتر شده اند. پیک در حوالی  $1700\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش خمشی گروه C-H آلیفاتیک نسبت داده می شود.

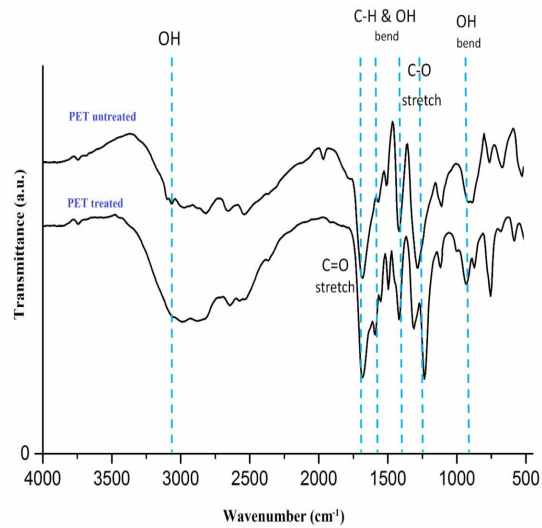
در تحقیقی که باربارو و همکارانش (۲۰۱۵) به منظور انجام تیمار پلاسما بر روی PET انجام دادند گزارش داده شده که حضور پلی اتیلن ترفتالات در تمام گراف ها بوسیله پیک های جذب مادون قرمز تایید شده است. همچنین پیک های پهن ایجاد شده به علت تشکیل گروه های کربونیلی جدید طی اکسیداسیون گزارش شده است [۳۵]. در تحقیق دیگر توسط هنرور و همکاران (۲۰۱۷) تیمار پلاسما بر روی فیلم پلی پروپیلن (PP) انجام شد و نشان داده شد ارتفاع پیک ها در تیمار پلاسما کمی تغییر داشته است. همچنین ارتعاشات کششی در گروه های C=O و OH دیده شده است. این نتایج نشان داد که تیمار پلاسما با استفاده از گاز هوا می تواند تشکیل گروه حاوی اکسیژن مانند C=O و OH در سطح فیلم پروپیلن را افزایش دهد. گزارش شده است که تشکیل رادیکال ها با جذب پروتون می تواند آغازگر تعدادی واکنش رادیکالی باشد و ایجاد کننده تعامل قطبی بین پلیمر با هوا  $O_2$  و همچنین با مواد پوشش دهنده باشد. بنابراین تیمار پلاسما سرد باعث جذب بهتر پلی پروپیلن روی سطح کربوکسی متیل



**Fig 5** Effects of different levels of ZnO NPs on tensile strength of the PET-CMC bilayer films. Different letters represent significant difference at 5% level of probability.

در تحقیق کنونی میزان سختی و انعطاف پذیری در فیلم های حاوی نانوذرات به ترتیب افزایش و کاهش یافت. بنابراین به وضوح دیده می شد که با افزودن نانوذرات خواص مکانیکی فیلم های نانویوکامپوزیت بهبود یافته است که این امر را می توان بدلیل بیشتر شدن شدت کریستاله نانوذرات اکسیدروی نسبت داد. تشدید کریستاله شدن پلیمر با افزایش نانوذرات اکسیدروی، موجب افزایش انسجام و تراکم بین زنجیره های پلیمر و کاهش فضای آزاد بین آنها می شود و دلیلی برای افزایش مقاومت کششی و کاهش ازدیاد طول فیلم های نانوکامپوزیتی محسوب می شود [۳۳]. وجود نانو ذرات می تواند به واسطه ی ایجاد پیوندهای هیدروژنی در بین دو سطح فیلم باعث تشدید چسبندگی شود. میزان رطوبت در سختی فیلم دو لایه موثر است و به همان اندازه می تواند در انعطاف آن نیز موثر باشد. نشان داده شده است که رطوبت در فیلم های بر پایه نشاسته و ژلاتین به عنوان یک پلاستیسایزر عمل می کند. به عبارتی دیگر می توان نتیجه گرفت که با کاهش محتوی رطوبت میزان E کاهش و TS افزایش می یابد [۲۷]. نکته مهم دیگر نانوذرات روی است، طوری که حضور نانوذرات، یک سطح بسیار وسیع را در فضای بین دو سطح پلیمری ایجاد کرده که با افزایش میزان نانو ذره مقدار TS افزایش می یابد [۳۱]. نتایج مشابهی نیز با اضافه کردن نانوذرات اکسیدروی به ترکیب صمغ ژلان و گزانتان گزارش

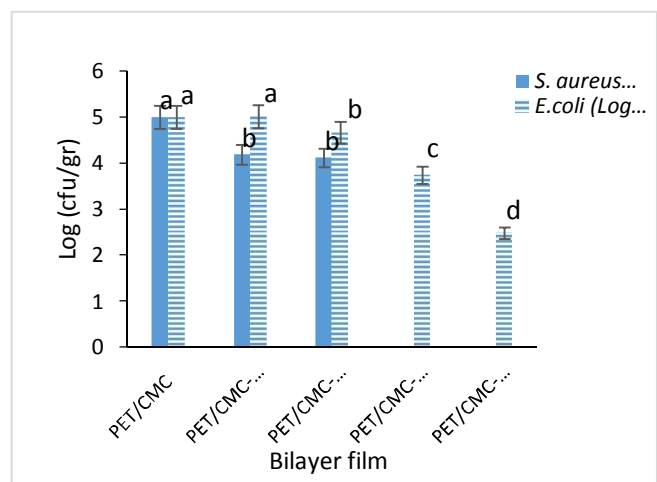
سلولز شد و فیلم تولیدی دارای سطحی زیر و ناهموار بود [۱۸].



**Fig 6** ATR-FTIR of the PET films: (a) untreated PET (b) plasma-treated PET

### ۳-۶- خواص ضد میکروبی

شمارش اولیه *استافیلوکوکوس اورئوس*  $10^5$  cfu/ml و برای *اشرشیاکلی*  $10^6$  cfu/ml کلنی در میلی لیتر بدست آمد. نتایج نشان داد (شکل ۷) با افزایش غلظت نانوذرات اکسیدروی، شمارش میکروبی بصورت معنی داری کاهش و در نتیجه خاصیت ضد میکروبی فیلم افزایش پیدا کرد. همچنان که دیده می شود کاهش قابل توجه بیشتری در زنده ماندن سلولی باکتری های گرم مثبت (*S. aureus*) نسبت به گرم منفی (*E. coli*) مشاهده شد.



**Fig 7** Effects of different levels of ZnO NPs on antimicrobial activity of the PET-CMC bilayer films. Different letters represent significant difference at 5% level of probability.

نتایج تحقیق حاضر مشخص کرد که خاصیت ضد میکروبی نانوذرات اکسید روی بر گرم مثبت موثرتر از باکتری های گرم منفی است. نتایج مشابه دیگری با افزودن نانوذرات اکسیدروی به فیلم نشاسته گندم سیاه [۲۵] و همچنین فیلم سه لایه سلولز [۳۶] گزارش شده است. نجفی و همکاران (۲۰۱۲) فعالیت ضد میکروبی فیلمهای نانوکامپوزیتی نشاسته ساگو/اکسید روی را مورد مطالعه قرار دادند. فیلم نشاسته ساگو حاوی اکسیدروی در برابر *S. aureus* نسبت به *E. coli* فعال تر بود [۳۱]. اعتقاد بر این است که فعالیت ضد میکروبی اکسیدروی عمدتاً به ساختار دیواره سلولی باکتریهای گرم مثبت و گرم منفی بستگی دارد. باکتری های گرم مثبت از ساختار دیواره سلولی ضخیم با چند لایه پپتیدوگلیکان تشکیل شده اند، در حالی که باکتری های گرم منفی از ساختار دیواره سلولی پیچیده با لایه نازک پپتیدوگلیکان تشکیل شده اند که توسط غشای خارجی احاطه شده است. وجود نانوذرات اکسید روی به طور مستقیم به غشاء خارجی سلول بیرونی باکتریهای گرم مثبت که حاوی منافذ زیادی است، متصل شده که سبب نفوذ نانوذرات به راحتی به داخل سلول گردیده و در نتیجه باعث نشت محتویات داخل سلولی می شود و نهایتاً منجر به مرگ سلول می شود. اما در مورد باکتری های گرم منفی، نانوذرات اکسیدروی در ابتدا به غشاء خارجی سلول باکتریایی متصل می شود که حاوی لیپوپروتئین، لیپوپلی ساکارید و فسفولیپیدهایی است که ممکن است باعث کاهش اتصال نانوذرات اکسیدروی شود [۱۶]. در تحقیق مشابهی که توسط کنمانی و همکاران (۲۰۱۴) به منظور بررسی اثرات ضد میکروبی فیلم های نانوکامپوزیتی بیوپلیمرهای مختلف مانند آگار، کاراگینان و CMC حاوی نانوذرات روی انجام گرفت، نشان داده شد افزودن نانوذرات اکسید روی بکار رفته در فیلم، رشد *L. monocytogenes* و *E. coli* را مهار می کند. همچنین مطالعه ای نشان داد که اسانس دارچین و نانوذرات  $TiO_2$  در فیلم های نشاسته ساگو دارای فعالیت ضد میکروبی بسیار خوبی در برابر *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* می باشند [۱۶، ۳۰].

### ۴- نتیجه گیری کلی



- [6] Motedayen, A. A., Khodaiyan, F., Atai Salehi, E., & Hosseini, S. S. (2019). Characterisation of biocomposite film made of kefiran and carboxymethyl cellulose (CMC). *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2(1), 61-70.
- [7] Mutsuga, M., Tojima, T., Kawamura, Y., & Tanamoto, K. (2005). Survey of formaldehyde, acetaldehyde and oligomers in polyethylene terephthalate food-packaging materials. *Food Additives and Contaminants*, 22(8), 783-789.
- [8] Welle, F., Bayer, F., & Franz, R. (2012). Quantification of the sorption behavior of polyethylene terephthalate polymer versus PET/PA polymer blends towards organic compounds. *Packaging Technology and Science*, 25(6), 341-349.
- [9] Heinze, Th. 2005. Carboxymethyl ethers of cellulose and starch: A review. *Center of excellence for polysaccharide research*, 3: 13-29 and nutrition, 47: 411-433
- [10] Brody, A. L., Strupinsky, E. P., & Kline, L. R. (2001). *Active packaging for food applications*. CRC press.
- [11] Emamifar, A., Kadivar, M., Shahedi, M. Soleimanian-Zad, S. (2010). Evaluation of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on shelf life of fresh orange juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 742-748.
- [12] Llorens, A., Lloret, E., Picouet, P. A., Trbojevich, R., & Fernandez, A. (2012). Metallic-based micro and nanocomposites in food contact materials and active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 24(1), 19-29.
- [13] Makari, M., Hojjati, M., Shahbazi, S., & Askari, H. (2021). Elimination of *Aspergillus flavus* from Pistachio Nuts with Dielectric Barrier Discharge (DBD) Cold Plasma and Its Impacts on Biochemical Indices. *Journal of Food Quality*, 2021.
- [14] Pankaj, S. (2015). Cold Plasma Treatment of Biodegradable films and smart packaging.
- [15] Ghanbarzadeh, B., Saianjali, S., & Ghiyasifar, S. H. (2011). Antifungal properties of CMC-based films containing potassium sorbate on selected *Aspergillus* strains in pistachio. *Journal of Food Science Technology*, 32(8), 43-50.
- [16] Kanmani, P., & Rhim, J. W. (2014). Properties and characterization of bionanocomposite films prepared with various biopolymers and ZnO nanoparticles. *Carbohydrate polymers*, 106, 190-199.
- [17] Yadav, M., Liu, Y. K., & Chiu, F. C. (2019). Fabrication of cellulose

نتایج این مطالعه نشان داد در فیلم دولایه کربوکسی متیل سلولز- پلی اتیلن ترفتالات حاوی نانوذرات اکسیدروی، افزایش غلظت نانو ذرات اکسیدروی از ۱٪ تا ۴٪ در فیلم های نانوکامپوزیتی باعث بهبود خصوصیات مکانیکی فیلم از جمله کاهش نفوذپذیری نسبت به بخار آب، افزایش مقاومت فیلم در برابر نیروی کششی و افزایش شفافیت فیلم و همچنین افزایش خصوصیات ضد میکروبی در برابر *E.coli* (باکتری گرم منفی) و *S.aureus* (باکتری گرم مثبت) شد. استفاده از تکنیک پلاسمای سرد باعث بهبود خاصیت چسبندگی دولایه ی فیلم به یکدیگر گردید. همچنین فیلم های حاوی نانوذرات دارای خواص مکانیکی، فیزیکی و ضد میکروبی بهتری نسبت به فیلم های بدون نانوذرات اکسیدروی بودند. بطور کلی استفاده از فیلم های CMC-PET حاوی نانو ذرات اکسیدروی به عنوان فیلم بسته بندی ضد میکروبی سازگار با محیط زیست<sup>۱۱</sup> و جایگزین فیلم های بسته بندی بر پایه ی نفتی یا سنتتیک، برای بسته بندی مواد غذایی توصیه می شود و می تواند به عنوان بسته بندی فعال، عمر ماندگاری مواد غذایی را افزایش دهند.

## ۵- منابع

- [1] Petrou, S., Tsiraki, M., Giatrakou, V., & Savvaidis, I. N. (2012). Chitosan dipping or oregano oil treatments, singly or combined on modified atmosphere packaged chicken breast meat. *International journal of food microbiology*, 156(3), 264-271.
- [2] Salmanian, H., Khodaiyan, F., & Hosseini, S. S. (2019). Biodegradable kefiran-chitosan nanocellulose blend film: Production and physical, barrier, mechanical, thermal, and structural properties. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2(2), 101-106.
- [3] Jafari, S., Hojjati, M., & Noshad, M. (2018). Influence of soluble soybean polysaccharide and tragacanth gum based edible coating to improve the quality of fresh-cut apple slices. *Journal of food processing and preservation*, 42(6), e13638.
- [4] Paunonen, S. (2013). Strength and barrier enhancements of cellophane and cellulose derivative films: a review. *BioResources*, 8(2), 3098-3121.
- [5] Appendini, P. and J. H. Hotchkiss (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 3(2): 113-126.

- nano TiO<sub>2</sub>. *Carbohydrate Polymers*, 134, 726-731.
- [28] Rukmanikrishnan, B., Ismail, F. R. M., Manoharan, R. K., Kim, S. S., & Lee, J. (2020). Blends of gellan gum/xanthan gum/zinc oxide based nanocomposites for packaging application: Rheological and antimicrobial properties. *International journal of biological macromolecules*, 148, 1182-1189.
- [29] Jafarzadeh, S., Alias, A. K., Ariffin, F., Mahmud, S., Najafi, A., & Ahmad, M. (2017). Fabrication and characterization of novel semolina-based antimicrobial films derived from the combination of ZnO nanorods and nanokaolin. *Journal of food science and technology*, 54(1), 105-113.
- [30] Arezoo, E., Mohammadreza, E., Maryam, M., & Abdorreza, M. N. (2020). The synergistic effects of cinnamon essential oil and nano TiO<sub>2</sub> on antimicrobial and functional properties of sago starch films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 157, 743-751.
- [31] Nafchi, A. M., Mahmud, S., & Robal, M. (2012). Antimicrobial, rheological, and physicochemical properties of sago starch films filled with nanorod-rich zinc oxide. *Journal of food engineering*, 113(4), 511-519.
- [32] Echeverría, I., Eisenberg, P., & Mauri, A. N. (2014). Nanocomposites films based on soy proteins and montmorillonite processed by casting. *Journal of Membrane Science*, 449, 15-26.
- [33] Sorrentino, A., Gorrasi, G., & Vittoria, V. (2007). Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. *Trends in food science & technology*, 18(2), 84-95.
- [34] Oun, A. A., & Rhim, J. W. (2020). Preparation of multifunctional carboxymethyl cellulose-based films incorporated with chitin nanocrystal and grapefruit seed extract. *International journal of biological macromolecules*, 152, 1038-1046.
- [35] Barbaro, G., Galdi, M. R., Di Maio, L., & Incarnato, L. (2015). Effect of BOPET film surface treatments on adhesion performance of biodegradable coatings for packaging applications. *European Polymer Journal*, 68, 80-89.
- [36] Jebel, F. S., & Almasi, H. (2016). Morphological, physical, antimicrobial and release properties of ZnO nanoparticles-loaded bacterial cellulose films. *Carbohydrate polymers*, 149, 8-19.
- nanocrystal/silver/alginate bionanocomposite films with enhanced mechanical and barrier properties for food packaging application. *Nanomaterials*, 9(11), 1523.
- [18] Honarvar, Z., Farhoodi, M., Khani, M. R., Mohammadi, A., Shokri, B., Ferdowsi, R., & Shojaee-Aliabadi, S. (2017). Application of cold plasma to develop carboxymethyl cellulose-coated polypropylene films containing essential oil. *Carbohydrate polymers*, 176, 1-10.
- [19] Arfat, Y. A., Benjakul, S., Prodpran, T., Sumpavapol, P., & Songtipya, P. (2014). Properties and antimicrobial activity of fish protein isolate/fish skin gelatin film containing basil leaf essential oil and zinc oxide nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 41, 265-273.
- [20] Kumar, S., Shukla, A., Baul, P. P., Mitra, A., & Halder, D. (2018). Biodegradable hybrid nanocomposites of chitosan/gelatin and silver nanoparticles for active food packaging applications. *Food packaging and shelf life*, 16, 178-184.
- [21] ASTM, (2016). Standard test method for water vapor transmision of materials ASTM standard: Philadelphia.
- [22] ASTM, (2018). Srtandard test method for tensile prperties of thin plastic sheeting ASTM standard: Philadelphia.
- [23] ISO 22196, (2011). ISO-International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- [24] Dashipour, A., Razavilar, V., Hosseini, H., Shojaee-Aliabadi, S., German, J. B., Ghanati, K., ... & Khaksar, R. (2015). Antioxidant and antimicrobial carboxymethyl cellulose films containing Zataria multiflora essential oil. *International journal of biological macromolecules*, 72, 606-613.
- [25] Kim, S., & Song, K. B. (2018). Antimicrobial activity of buckwheat starch films containing zinc oxide nanoparticles against *Listeria monocytogenes* on mushrooms. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(6), 1549-1557.
- [26] Sanchez-Garcia, M. D., Lagaron, J. M., & Hoa, S. V. (2010). Effect of addition of carbon nanofibers and carbon nanotubes on properties of thermoplastic biopolymers. *Composites science and technology*, 70(7), 1095-1105.
- [27] Shaili, T., Abdorreza, M. N., & Fariborz, N. (2015). Functional, thermal, and antimicrobial properties of soluble soybean polysaccharide biocomposites reinforced by



## Scientific Research

## Application of plasma surface treatment to produce CMC-PET/ZnO bilayer nanocomposite film as a novel food packaging

Nasiri, S. L.<sup>1</sup>, Azizi, M. H.<sup>2\*</sup>, Movahedi, F.<sup>3</sup>, Rahimifard, N.<sup>4</sup>, Tavakolipour, H.<sup>5</sup>

1. PhD student of Food Science and Technology, Department of Food Science and Technology, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. Department of Cellulosic Materials and Packaging, Chemistry and Petrochemistry Research Center, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran.
4. Food and Drug Control Laboratories, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran.
5. Department of Food Science and Technology, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran.

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

## Article History:

Received 2021/ 07/ 25  
Accepted 2021/ 10/ 10

## Keywords:

Nanocomposite film,  
ZnO nanoparticles,  
Cold plasma,  
Antimicrobial activity,  
Mechanical properties.

DOI: 10.52547/fsc.18.120.19

DOR: 20.1001.1.20088787.1400.18.120.28.0

\*Corresponding Author E-Mail:  
azizit\_m@modares.ac.ir

In this study, PET-CMC bilayer nanocomposites films containing different levels of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs; 0%, 1%, 2%, 3%, 4%) were prepared and characterized. For better attachment of CMC on Polyethylene terephthalate (PET), atmospheric plasma pretreatment was used. The water vapor permeability, moisture, mechanical and microbial properties of the films were analyzed. Also, in order to investigate the effect of plasma treatment on improving the properties of bilayer films, a comparison was made between plasma treated and untreated bilayer films using FTIR test. Results showed the formation of polar groups such as C=O and OH on the PET surface following the plasma treatment which improved the adhesion of the two layers of polymer to each other. The water vapor permeability of PET-CMC films containing ZnO NPs decreased compared to the pure film with increasing the ZnO NPs percentage. Increasing the nanoparticles percentage had a positive impact on the tensile strength and increased this factor from 123.77 to 466.80 MPa, while the elongation at break decreased from 48.38% to 10.59%, and the nanocomposite films were revealed more resistant compared to the pure PET-CMC film, which facilitates the transport and storing of the foodstuffs. In addition, the presence of ZnO NPs in PET-CMC films exhibited antimicrobial activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. In general, this research verifies improvement in physical, mechanical, and microbial characteristics of PET-CMC nanocomposite films along with the increasing of ZnO NPs. Our findings suggest that plasma-treated PET/CMC films have the potential for application in food antimicrobial packaging and can extend the shelf-life of packaged food as active packaging.