مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۱/ شماره ۲/سال ۱۳۸۹/ص ۷۲-۵۹

بررسی ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های نانویی نقره- رس برای بسته‌بندی مواد غذایی

سعید مینایی، میثم ستاری نجف آبادی*، محمد حسین عزیزی و حامد افشاری**

* نگـــارنده مسئول، نشانی: دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۳۳۶-۱۴۱۱۵، تلفن: ۴۴۵۸۰۵۰۰(۰۲۱)، پیام‌نگار: sattari.utm@gmail.com

** به ترتیب دانشیار؛ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیـت مـدرس؛ دانـشیار گـروه علـوم و صنایع غذایی دانشگاه تربیت مدرس؛ و استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

تاریخ دریافت: ۸۸/۷/۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۲/۱۵

چکیده

در این پژوهش، ویژگی‌های مکانیکی هفت نوع فیلم نانویی با درصدهای مختلف نقره و رس- نقره، شامل مـدول الاستیـسیته، مقاومت کششی، چغرمگی، درصد کشیدگی تا پاره شدن، مقاومت در برابر رشد پارگی، و رنگ فیلم‌های نانویی بررسی شـده و با فیلم شاهد (فاقد ذرات نانو) مقایسه شد. نتایج نشان داد که با به‌کار بردن ذرات نانویی در فیلم پلی‌اتیلن با دانسیتهٔ پـایین (LDPE)، مدول‌الاستیسیته، مقاومت کششی و مقاومت در برابر رشدپارگی، به میـزان ۱/٤ تـا ۲/۵ برابـر افـزایش مـی‌یابـد درحالی‌که درصد کشیدگی تا پاره شدن و چغرمگی، به میزان ۱/۱ تا ٤ برابر کاهش خواهد یافت. اثر نوع فیلم نانویی بر مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و مقاومت در برابر رشد پارگی در سطح ۰/۹۹ و درصد میزان کشیدگی تا پاره شدن و چغرمگـی فیلم، در سطح ۰/۹۵ معنادار است. با بررسی پارامترهای مربوط به رنگ و به دست آوردن اختلاف رنگ کلـی فـیلم‌هـا (ΔE)، مشخص شد که فیلم دارای ۱۰۰۰ قسمت در میلیون نانو نقره (S2)، در مقایسه با سایر فیلم‌ها رنگ بیـشتری دارد. کمتـرین اختلاف رنگ کلی مربوط به فیلم شاهد است. اختلاف رنگ کلی در فیلم‌های نانو نقره، با افزایش درصد نقره افزایش می‌یابـد، ولی در فیلم‌های ترکیبی با افزایش درصد رس کاهش نشان می‌دهد. در مجموع، با توجه به نتایج آزمـون رنـگ، فـیلم شـاهد (فاقد ذرات نانو) و فیلم دارای ۱۰۰۰ قسمت در میلیون نانو نقره (S2)، بهترین و بدترین نوع فیلم شناخته شدند. در مجمـوع، فیلم نانویی ترکیبی ۳ درصد (SC3)، دارای «۵۰۰ قسمت در میلیون نقره-٤۵۰ قست در میلیون رس» از نظر خواص مکانیکی، نسبت به سایر فیلم‌ها در سطحی قابل قبول‌تر قرار دارد، اما مشکل عمده‌ای که دارد، رنگ تیرهٔ آن بـه دلیـل وجـود ذرات رس است که ممکن است برای بسته‌بندی برخی مواد غذایی (که رنگ بسته نقش مهمی دارد) مناسب نباشـد. در چنـین مـواردی، فیلم‌های نانویی ترکیبی با درصد کمتر ذرات رس می‌تواند به‌کار برده شود وگرنه باید به دنبال راه‌های رفع تیرگی آن بود.

واژه‌های کلیدی

بسته‌بندی موادغذایی، فیلم‌های نانویی، ویژگی‌های مکانیکی

مقدمه

سالانه به طور متوسط حدود ۳۰ درصـد از محـصولات کشاورزی تولید شده در کشور به ضایعات تبدیل مـی‌شـود که ۷ تا ۸ درصد آن به علت بسته‌بندی نامناسب است. به گزارش ایسنا، در بسته‌بندی محصولات کشاورزی می‌تـوان سالانه حدود ۸ درصد از ضایعات را در این بخـش کـاهش داد. معرفی ساده‌ترین تکنولوژی تولیـد بـسته‌بنـدی‌هـای نانویی با فناوری‌های داخل کشور، بررسی مسائل مربوط به ایمنی زیستی و قابلیت انتقال ذرات نانو از بـسته‌بنـدی بـه محصولات غذایی، و اقتصادی بودن استفاده از این بسته‌هـا در کشور مسایل مهمـی هـستند کـه بایـد بررسـی شـوند. براورد می‌شود که استفاده از بسته‌بندی‌های نانو و کـاهش

© 2013,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ضایعات محصولات کشاورزی، سالانه ۱۶۴ تا ۱۸۷ میلیون دلار صرفه‌جویی اقتصادی را در کشور به همراه خواهد داشت (Tajeddin, 2003).

فناوری نانو در جهت بسته‌بندی و کاهش ضایعات هنوز در آغاز راه قرار دارد، ولی در همین چند سال اخیر امیدهای زیادی در میان دانشمندان برای دستیابی به مواد با قابلیت‌های ویژه و ساخت محصولات با عمر و کیفیت بالا ایجاد کرده است (Mararu *et al*., 2005).

تحقیقات بسیاری به منظور بهبود خواصی نظیر پایداری ابعادی، سفتی، مقاومت و دیگر خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌اتیلن برای حفظ جایگاه رقابتی این ماده در کاربردهای مهندسی صورت می‌گیرد. با ساخت کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن و الیاف تقویت‌کننده از طریق فناوری‌های نوین فرایند و شکل دهی خاص این‌گونه مواد و همچنین تهیه ترکیبات پر شده و ایجاد و تولید گونه‌های جدیدی از پلی اتیلن، چنین هدفی دست یافتنی است.

لیدانی و همکاران (Laidani *et al*., 2008) ویژگی‌های مکانیکی و نوری فیلم‌های نانوکامپوزیت zirconia-carbon را بررسی کردند. نتایج تحقیقات این محققان تغییر مدول الاستیسیته[1] به واسطهٔ تغییر مقدار کربن بود. در تحقیقی دیگر میسجاک و همکاران (Misjak *et al*., 2007) خواص مکانیکی و ساختاری فیلم‌های نانو کامپوزیتی نقره- مس را بررسی کردند. فیلم‌ها تحت فاصله زمانی و تحت فشار بخار حرارتی در خلا کامل ساخته شدند. نتیجه این بود که با افزایش درصد نقره، خواص مکانیکی تغییر می‌کند. بیشترین سختی به دست آمده در حدود ۴ مگاپاسکال برای ترکیب حاوی ۲۰ درصد نانو نقره به دست آمد.

بررسی ویژگی‌های مکانیکی و نفوذپذیری و رئولوژیکی فیلم‌های نانو کامپوزیتی با پایهٔ پلی‌پروپیلن توسط لوتی و همکاران (Lotti *et al*., 2008)، حاکی از افزایش مدول الاستیسیته تا ۹۵ درصد و کاهش نفوذپذیری نسبت به اکسیژن و بخار آب به میزان، ۶۰ و ۴۵ درصد بود. میزان کشیدگی تا پاره شدن (EB)، نیز افزایش یافت.

وانگ و همکاران (Wang *et al*., 2008) به ساخت فیلم nc-TiC/a-C:H به روش تکنیک پلاسمای دوگانه پرداختند و خواص مکانیکی و ساختاری آن را بررسی کردند که نتایج حاکی از افزایش بسیار زیاد مدول الاستیسیته و سختی به ترتیب در حد ۵۱۰ و ۶۶/۴ مگاپاسکال بود.

در پژوهشی دیگر کاوو و همکاران (Cao *et al*., 2008) اثر ضخامت را بر خواص الاستیکی فیلم نانویی ZnO، بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش ضخامت، مدول الاستیسیته فیلم‌های نانویی ZnO کاهش می‌یابد.

بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی انواعی از فیلم‌های نانوکامپوزیت[2] تحت تأثیر ذرات نانو رس به تازگی گزارش شده است (Viviana *et al*., 2008). نتیجهٔ تست کشش روی فیلم‌ها حاکی از اثر معنادار ذرات رس در افزایش مدول الاستیسیته تا ۵۰۰ درصد بود. لی‌جی و همکاران (Li Ji *et al*., 2008) با استفاده از پرتو X به بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت Mo/DLC پرداختند. طبق گفتهٔ این پژوهشگران، این روش برای بررسی سختی و مدول الاستیسیته مفید است. پرتو X می‌تواند در تخمین و بررسی مقدار عددی ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های نانویی به‌عنوان ابزاری دقیق به‌کار رود.

نانوکامپوزیت‌ها یا فیلم‌های نانویی می‌توانند خواص مقاومت در مقابل گرما و مقاومت مکانیکی را بهبود بخشند و سرعت انتقال گازها را کمتر کنند. فیلم‌های نانویی با خواص آنتی‌باکتریال خود به دلیل وجود ذرات نقره و همچنین نفوذپذیری کمتر نسبت به اکسیژن و بخار آب به دلیل ذرات رس نسبت به فیلم‌های معمولی، در نگهداری از مواد غذایی بسته‌بندی شده، افزایش ماندگاری و جلوگیری از بیات شدن محصولاتی مانند نان، نقش قابل

1- Elastic Modulus
2- Starch/montmorillonite

توجهی دارند. بهبود خواص مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و خروج بخار آب از بسته‌ها، به حفظ تازگی مواد غذایی بسته‌بندی شده کمک می‌کند و باعث افزایش ماندگاری آن می‌شود (Sattari Najaf Abadi *et al.*, 2009).

در این تحقیق، نانو فیلم‌هایی برای بسته‌بندی مواد غذایی ساخته و آزمایش شدند. بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون کاری در زمینه فیلم‌های نانویی ترکیبی با ساختار نقره- رس، گزارش نشده است. ویژگی‌های مکانیکی نانوفیلم‌ها برای بسته‌بندی مواد غذایی بررسی و نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS، مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ویژگی‌های مکانیکی هفت نوع فیلم نانویی تهیه شده بررسی و نتایج آن با فیلم شاهد (فاقد ذرات نانو) مقایسه شد. فیلم‌های مورد استفاده بر پایه پلی‌اتیلن[1] (LDPE) درجه ۰/۷۵و مستربچ حاوی ۲۰ درصد نقره است که تحت شرایط دمایی ۱۹۵- ۱۶۵ درجه سلسیوس و سرعت ۵۰ دور در دقیقه، به روش بر هم کنش مذاب و با همکاری ستاد نانو ریاست جمهوری تولید شده است.

جدول ۱، خصوصیات به‌کار برده شده را نشان می‌دهد. دامنهٔ استفاده از ذرات نقره در این تحقیق۲۵۰ تا ۱۰۰۰ قسمت در میلیون است. مقادیر کمتر از ۲۵۰ قسمت در میلیون، تأثیر ناچیز بر ویژگی‌های ضد میکروبی دارد و مقادیر بیشتر از ۱۰۰۰ قسمت در میلیون، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. استفاده از ذرات نانو رس، در دامنه‌ای کمتر از ۱۵۰ قسمت در میلیون کم تأثیر است و بیشتر از ۴۵۰ قسمت در میلیون نیز تأثیر منفی در رنگ فیلم‌های نانویی ایجاد می‌کند که در بسته‌بندی محصولات غذایی با اهمیت است (Anon, 2007).

جدول ۱- روش نامگذاری فیلم‌های به‌کار رفته در پژوهش

شماره تیمار	نماد تیمار	ترکیب و درصد
۱	W	شاهد
۲	S 0.5	۲۵۰ قسمت در میلیون نقره (۰/۵ درصد نقره)
۳	S 1	۵۰۰ قسمت در میلیون نقره (۱درصد نقره)
۴	S 1.5	۷۵۰ قسمت در میلیون نقره (۱/۵درصد نقره)
۵	S 2	۱۰۰۰ قسمت در میلیون نقره (۲درصد نقره)
۶	SC 1	۵۰۰ قسمت در میلیون نقره - ۱۵۰ قسمت در میلیون رس (ترکیبی ۱ درصد)
۷	SC 2	۵۰۰ قسمت در میلیون نقره- ۳۰۰ قسمت در میلیون رس (ترکیبی ۲ درصد)
۸	SC 3	۵۰۰ قسمت در میلیون نقره- ۴۵۰ قسمت در میلیون رس (ترکیبی ۳ درصد)

1- Low Density Poly Ethylene

ضخامت فیلم

ضخامت فیلم‌ها با میکرومتر مدل Mitotyo و با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر در ۱۰ نقطهٔ متفاوت فیلم‌ها اندازه‌گیری و از میانگین این اعداد در تعیین ویژگی‌های مکانیکی استفاده شد.

ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های نانویی

در این پژوهش، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی[1]، چغرمگی[2]، درصد کشیدگی تا پاره شدن[3]، مقاومت در برابر رشد پارگی[4] و رنگ فیلم‌های نانویی تعیین و بررسی شد. "مدول الاستیسیته" بیانگر مقاومت در برابر کشش نمونه، "مقاومت کششی" بیانگر مقاومت در برابر پاره شدن و "درصد میزان کشیدگی تا پاره شدن" بیانگر میزان کشش‌پذیری نمونه است. میزان چغرمگی از طریق محاسبهٔ سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطهٔ پارگی[5] (Mohsenin, 1970) و با استفاده از نرم افزار اکسل به دست آمد.

دستگاه آزمون مواد

دستگاه آزمون مواد مورد استفاده برای اجرای آزمایش‌ها، مدل 2.5H1S WN:150888 ساخت شرکت ZWICK بود. نیرو در دستگاه از طریق بارسنج‌های کرنش سنج‌دار Z شکل قابل استفاده در حالت کشش و فشار اندازه‌گیری می‌شود. برای اجرای آزمایش‌ها، بارسنج ۵۰۰ نیوتن به‌کار برده شد. آزمون کشش برای مقایسهٔ مقاومت کششی، مدول یانگ، درصد ازدیاد طول در نقطهٔ پارگی و چغرمگی نمونه‌های نانویی، نسبت به پلی‌اتیلن خالص صورت گرفت. نانوکامپوزیت‌ها دسته‌ای از کامپوزیت‌ها و دارای خواص مکانیکی بالاتری نسبت به زمینه خالص دارند. اما آزمون کشش روی این مواد به دلایل مختلف از جمله دقت پایین گیرهٔ نگهدارندهٔ فیلم‌ها، اغلب دشوار است به خصوص اینکه آزمون روی فیلم نانویی با ضخامت بسیار کم انجام شود. این آزمون ۵ مرتبه تکرار شد.

شکل ۱- نمایی از دستگاه آزمون مواد

1- Tensile Strength
2- Toughness
3- Elongation at Break Percent
4- Tear Strength
5- Rupture Point

نحوهٔ آزمایش کشش فیلم‌ها

طبق استاندارد، فیلم ها به ابعاد ۶ ×۱ سانتی‌متر با تیغهٔ برش بریده و در شرایط محیطی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت نگهداری و سپس آزمون کشش با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه با فاصله داخلی ۱۰۰ میلی‌متر دو فک اجرا شد (Anon, 1989a). باید توجه داشت که این آزمون برای کامپوزیت‌ها و فیلم‌ها به نوع آماده‌سازی نمونه بسیار حساس است. در مورد فیلم‌های نانویی ترکیبی این آماده‌سازی بسیار با اهمیت است به‌صورتی‌که برش نمونه‌ها در ابعاد مشخص شده در استاندارد با تیغه‌های برش معمولی علی‌رغم ظاهر مناسب با چشم غیر مسلح، نتایج بسیار نامطلوبی دارد. بنابراین، نمونه‌ها با قیچی‌های ویژه عکاسی با لبه‌های صاف بریده شدند.

مقاومت در برابر رشد پارگی

این آزمایش طبق استاندارد (Anon, 1989b) انجام شد. مقاومت در برابر رشد پارگی عامل مهمی برای ارزیابی نمونه پس از شکاف خوردن آن است. مقاومت در برابر رشد پارگی بر حسب گرم سنجیده می‌شود.

دستگاه آزمایش مقاومت به پارگی (شکل ۲)، دارای یک گیرهٔ ثابت و یک گیرهٔ متحرک روی آونگ است. گیرهٔ متحرک برای نگه داشتن آونگ در موقعیت بالاتر است. با رها شدن آونگ، مسیر کمانی شکلی طی می‌شود و دستگاه نیز مسیر را ثبت می‌کند. نمونه‌های فیلم در دستگاه با گیر بسته و برای شروع پارگی طبق استاندارد (Anon, 1989b) شکاف داده می‌شوند. آونگ سپس رها و سبب پاره شدن نمونه می‌شود. مسیر طی شده توسط دستگاه ثبت می‌گردد. کمان طی شده با مقاومت نمونه در برابر پارگی نسبت دارد. در عملیات بسته‌بندی، فیلمِ با مقاومت زیاد در برابر پارگی مورد نیاز است. ولی برای باز کردن راحت بعضی از بسته‌ها مقاومت کم در برابر پاره شدن مطلوب است. این آزمون روی فیلم‌ها پنج بار تکرار شد.

شکل ۲- دستگاه آزمایش مقاومت در برابر رشد پارگی در فیلم

آزمون رنگ فیلم‌ها

برای این منظور دستگاه هانتر لب (Hunter Lab) مدل ۴۵/۰°، ساخت کشور ژاپن (شکل ۳)، به‌کار برده شد. برای کالیبره کردن دستگاه، از دو کاشی سیاه و سفید استفاده گردید. نمونه‌ها روی دستگاه قرار داده شده و با فشار دادن کلید خواندن، دستگاه رنگ نمونه‌ها را به صورت عدد مربوط به سه فاکتور L^*، a^* و b^* مشخص کرد که به ترتیب بیانگر میزان (سیاهی- سفیدی)، (قرمزی- سبزی)، و (آبی-زردی) هستند. سیاهی-سفیدی در محدوده‌ای بین صفر (تیرگی) تا ۱۰۰ (روشنایی)، a^* مثبت نشان دهندهٔ تمایل به قرمزی، a^* منفی نشان‌دهندهٔ تمایل به سبزی، b^* مثبت نشان دهندهٔ تمایل به رنگ آبی و b^* منفی نشان دهندهٔ تمایل به رنگ زرد است.

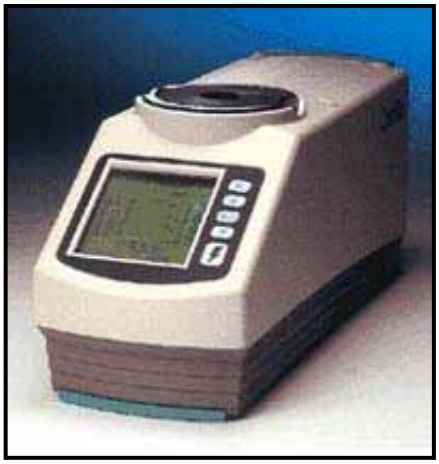
همچنین اختلاف رنگ کلی مربوط به فیلم‌ها با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه شد (Joo-Won Lee *et al*., 2008).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (۱)$$

در این رابطه،

$\Delta L = (L^* - L_0^*)$؛ $\Delta a = (a^* - a_0^*)$؛ و $\Delta b = (b^* - b_0^*)$ است؛ و L_0^*، a_0^*، b_0^* نیز مربوط به پارامترهای رنگی استاندارد و L^*، a^*، b^* مربوط به پارامترهای رنگی نمونه هستند. آزمایش‌ها برای هر نوع فیلم نانویی سه بار تکرار و نتایج ثبت شد.

در پایان، کلیهٔ نتایج با استفاده از آنالیز واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن، تجزیه و تحلیل شدند.



شکل ۳- دستگاه هانتر لب برای تعیین رنگ فیلم‌ها

نتایج و بحث

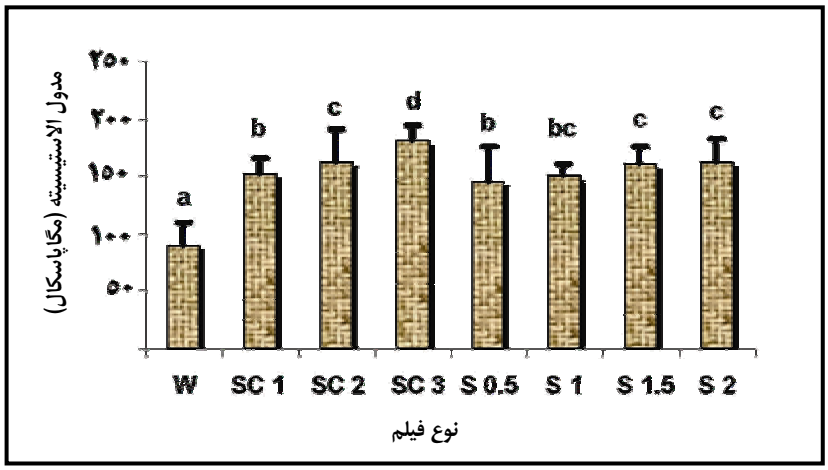
بررسی ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌ها

آزمون کشش برای مقایسهٔ مقاومت کششی، مدول یانگ، درصد افزایش طول در نقطهٔ پارگی و چغرمگی نمونه‌های نانویی، با پلی‌اتیلن خالص، آزمون کشش اجرا شد. بهبود خواص مکانیکی فیلم‌های بسته‌بندی، باعث افزایش مقاومت بسته در برابر نیروهای خارجی و جلوگیری از پاره شدن آن می‌شود و با افزایش ماندگاری، ضایعات محصولات غذایی پایین می‌آید.

مدول الاستیسیته

آزمون مقایسه میانگین‌ها بر مدول الاستیسیته اجرا شد و نتایج آن در شکل ۴ آمده است. حروف غیر یکسان در هر ستون نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۰/۹۵ است. همچنین، اثر نوع فیلم نانویی بر مدول الاستیسیته در سطح ۰/۹۹ معنادار است.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که به‌کار بردن ذرات نانو نقره و نانو رس در فیلم LDPE، مدول الاستیسیته را به طور قابل مشاهده‌ای افزایش داده است که دلیل آن می‌تواند سخت شدن ذات پلیمر بر اثر ذرات نانو رس با لایه‌های نازک نانومتری باشد که ساختاری صفحه مانند دارند. شکل ۴ نشان می‌دهد که، با افزایش میزان ذرات نقره، مدول الاستیسیته به طور نسبی افزایش یافته است. در نانو فیلم‌های ترکیبی هم با افزایش درصد ذرات رس، این افزایش قابل رویت است. در میان فیلم‌های موجود، فیلم نانویی ترکیبی شماره ۳ (SC3) بیشترین و فیلم شاهد (W) کمترین مقدار مدول الاستیسیته را دارند. به کاربردن مواد نانویی، مدول الاستیسیته را ۱/۵ تا ۱/۹ برابر افزایش داده است. در تحقیقات لیدانی و همکاران (Laidani *et al.*, 2008)، میسجاک و همکاران (Misjak *et al.*, 2007)، لوتی و همکاران (Lotti *et al.*, 2008) ، وانگ وهمکاران (Wang *et al.*, 2008)، و لی‌جی و همکاران (Li Ji *et al.*, 2008) برای فیلم‌های نانویی مشابه گزارش شده است. در فیلم‌هایی که این محققان ساخته‌اند با افزایش درصد مواد نانویی، مدول الاستیسیته افزایش یافته بود.



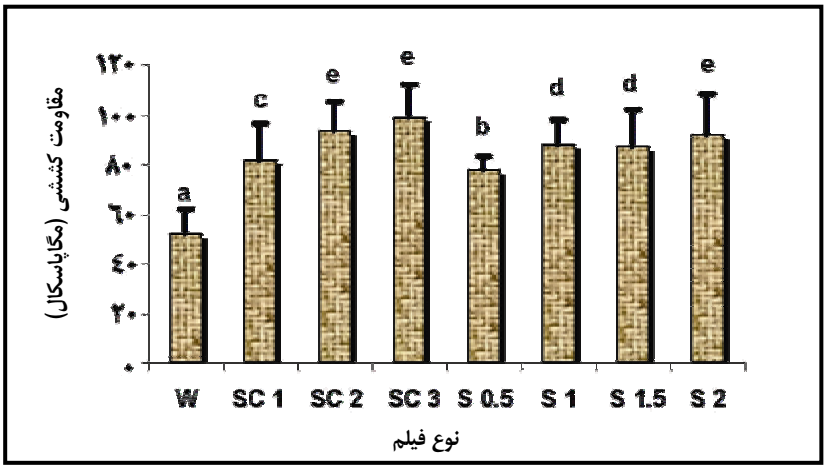
شکل ٤- رابطهٔ انواع فیلم های نانویی با مدول الاستیسیته

(میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.)

مقاومت کششی

نتایج آزمون مقایسه میانگین مقاومت کششی فیلم‌ها تا نقطهٔ پارگی در شکل ۵ آمده است. اثر نوع فیلم بر مقاومت کششی در سطح ۰/۹۹ معنادار است. با به کار بردن مواد نانویی در فیلم LDPE مقاومت کششی به طور قابل توجهی افزایش یافته است (شکل ۵). دلیل افزایش مقاومت کششی برهمکنش بین لایه‌های سیلیکاتی و پلیمر است. ضمناً خاک رس و ذرات نقره که موادی صلب هستند ممکن است باعث افزایش سفتی و گرانروی زمینه شوند. افزایش میزان پراکندگی ذرات رس موجب افزایش سطح المان‌های ویژهٔ تقویت‌کننده‌ای است که سطح ویژه‌ای در حدود ۷۰۰ متر مربع بر گرم دارند و این سطح

بر خواص نهایی فیلم‌ها به شدت تأثیرگذار است. به همین دلایل استحکام نانوکامپوزیت‌ها از زمینهٔ خالص بالاتر است. در میان فیلم‌های موجود، بیشترین و کمترین مقاومت کششی به ترتیب مربوط به فیلم نانویی ترکیبی شماره ۳ (SC3) و فیلم شاهد (W) است. به‌کاربردن مواد نانویی، مقاومت کششی را ۱/۴ تا ۲/۱ برابر افزایش داده است. در تحقیقات لیدانی و همکاران (Laidani *et al.*, 2008)، میسجاک و همکاران (Misjak *et al.*, 2007)، لوتی و همکاران (Lotti *et al.*, 2008)، وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2008)، و لی‌جی و همکاران (Li Ji *et al.*, 2008) نتایجی مشابه برای فیلم‌های نانویی نتایجی مشابه به دست آمده است.



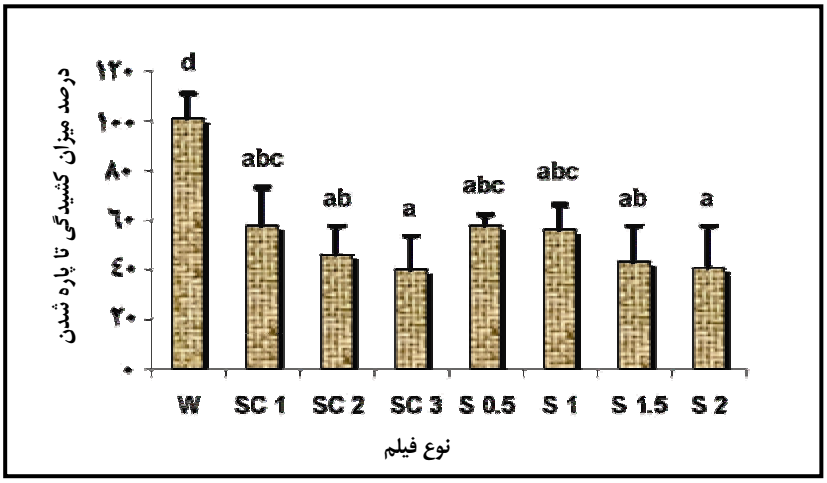
شکل ۵- رابطهٔ نوع فیلم و مقاومت کششی

(میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.)

درصد کشیدگی تا پاره شدن

نمودار مربوط به نتایج آزمون مقایسهٔ میانگین درصد میزان کشیدگی تا پاره شدن در شکل ۶ آمده است. اثر نوع فیلم بر درصد میزان کشیدگی تا پاره شدن در سطح ۰/۹۵ معنادار است.

با به‌کار بردن ذرات نانویی (شکل ۶)، درصد کشیدگی تا پاره شدن کاهش یافته است. وجود پرکننده‌ها در بعضی از نقاط زمینهٔ پلیمری باعث نقص، افزایش سفتی، و گرانروی زمینه شده، که نتیجهٔ تمام این عوامل کاهش درصد کشیدگی تا پاره شدن نسبت به پلیمر خالص است. با توجه به شکل ۶، با افزایش میزان ذرات نقره، مقاومت در برابر پارگی کاهش یافته است. در نانو فیلم‌های ترکیبی نیز با افزایش میزان ذرات رس، این کاهش قابل رویت است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین و کمترین مقدار کشیدگی به ترتیب مربوط به فیلم شاهد (W) و فیلم نانویی ترکیبی شماره ۳ (SC3) است. به‌کاربردن مواد نانویی، درصد میزان کشیدگی تا پاره شدن را ۱/۴ تا ۲/۱ برابر کاهش داده است. در تحقیقات میسجاک و همکاران (Misjak *et al.*, 2007)، وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2008)، ویویانا و همکاران (Viviana *et al.*, 2008)، و لی‌جی و همکاران (Li Ji *et al.*, 2008) نتایجی مشابه به دست آمد.

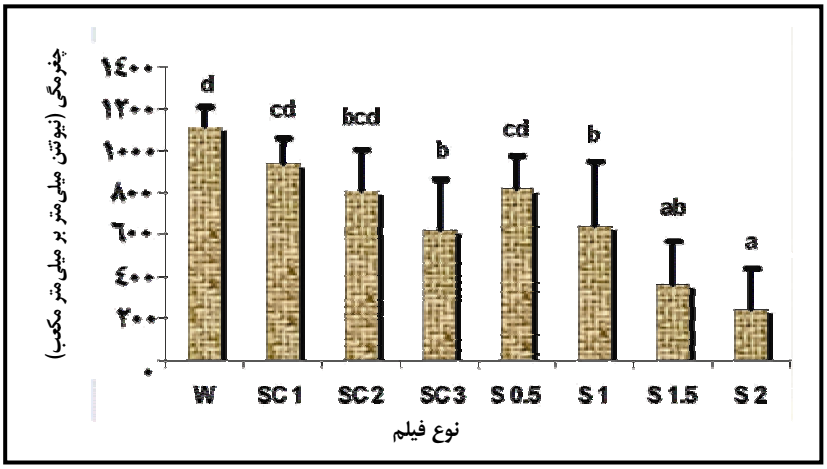


شکل ٦- رابطهٔ نوع فیلم با درصد میزان کشیدگی تا پاره شدن

(میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ٥ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.)

چغرمگی

میزان چغرمگی از طریق محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطهٔ پارگی به دست آید. نتایج آزمون مقایسهٔ میانگین‌ها در شکل ۷ مشاهده می‌شود. همچنین اثر نوع فیلم بر چغرمگی در سطح ۰/۹۵ معنادار بوده است. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که با به‌کار بردن مواد نانویی در فیلم LDPE، چغرمگی کاهش یافته است. در نانو فیلم‌های ترکیبی نیز کاهش چغرمگی با افزایش درصد رس، قابل رویت است. طبق شکل۷، بیشترین و کمترین مقدار چغرمگی به ترتیب آن مربوط به فیلم شاهد (W) و نانوی نقره ۲ درصد (S2) است. به‌کاربردن مواد نانویی، چغرمگی را ۱/۳ تا ۴/۲ برابر کاهش داده است.



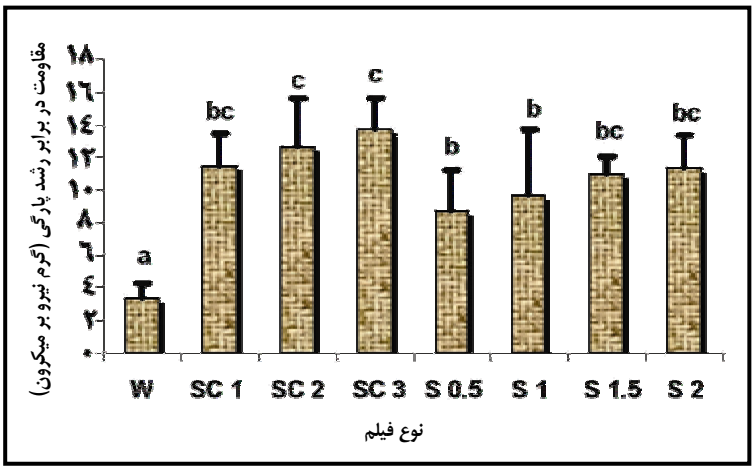
شکل ۷- رابطهٔ نوع فیلم با چغرمگی

(میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ٥ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.)

مقاومت در برابر رشد پارگی

نمودار مربوط به نتایج آزمون مقایسهٔ میانگین مقاومت در برابر رشد پارگی در شکل ۸ آمده است. اثر نوع فیلم بر مقاومت در برابر رشد پارگی در سطح ۰/۹۹ معنادار است.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با به‌کار بردن مواد نانو کامپوزیتی درفیلم LDPE، مقاومت در برابر رشد پارگی افزایش یافته است. با توجه به شکل ۸، با افزایش ذرات نقره، مقاومت را در برابر رشد پارگی به طور نسبی افزایش داده است. در نانو فیلم‌های ترکیبی این افزایش بیشتر قابل رویت است. ذرات نقره و رس به افزایش میزان بلورینگی کمک می‌کند، باعث افزایش سختی زمینهٔ پلیمری می‌شود. در میان فیلم‌های موجود، فیلم نانویی ترکیبی شماره ۳(SC3)، و فیلم شاهد (W) به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت را در برابر رشد پارگی دارند. به‌کار بردن مواد نانویی، مقاومتدر برابر رشد پارگی را ۲/۵ تا ۴/۱ برابر افزایش داده است.



شکل ۸- رابطهٔ انواع فیلم‌های نانویی و مقاومت در برابر رشد پارگی

(میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.)

انواع فیلم‌ها و آزمون رنگ آنها

نتایج مربوط به مقایسه میانگین داده‌های آزمون رنگ انواع فیلم در جدول ۲ آمده است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار L^* مربوط به نمونهٔ شاهد است که ذرات نانویی ندارد و دارای بیشترین روشنایی است. کمترین مقدار L^* در فیلم‌های نانو نقره مربوط به فیلم S2 و در فیلم‌های نانویی ترکیبی مربوط به فیلم SC1 است. نتایج نشان می‌دهد که L^* با افزایش درصد نقره، کاهش، ولی با افزایش درصد رس، افزایش می‌یابد. در کل با افزودن مواد نانویی، L^* نسبت به نمونهٔ شاهد کاهش نشان می‌دهد. کمترین و بیشترین مقدار a^* به ترتیب مربوط به نمونهٔ شاهد (W) و S2 است. در جدول ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نقره، a^* هم افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده گرایش به سمت رنگ قرمز است. افزایش a^*، در فیلم‌های نانویی ترکیبی، همراه با افزایش درصد رس نیز مشاهده می‌شود. کمترین و بیشترین مقدار b^* به ترتیب مربوط به فیلم شاهد (W) و نمونهٔ S2 است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نقره،

b^* هم افزایش می‌یابد که این نشان دهندهٔ گرایش به سمت رنگ آبی است. در فیلم‌های نانویی ترکیبی، با افزایش میزان رس، b^* کاهش می‌یابد.

با بررسی هر سه عامل رنگی و به دست آوردن اختلاف رنگ کلی (ΔE) فیلم‌ها، مشخص شد که فیلم S2 در مقایسه با سایر نمونه‌ها رنگ بیشتری دارد که احتمالا به دلیل b^* بالای آن است. کمترین اختلاف رنگ کلی مربوط به فیلم شاهد است. اختلاف رنگ کلی در فیلم‌های نانو نقره، با افزایش درصد نقره افزایش، ولی در فیلم‌های ترکیبی با افزایش درصد رس، کاهش یافته است.

جدول۲- رابطهٔ انواع فیلم‌های نانویی با ویژگی‌های رنگی آن‌ها

انواع فیلم	L^*		a^*		b^*		ΔE	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
W	۹۲/۴۰d	±۰/۱۶	-۱/۴۷a	±۰/۰۴	۱/۶a	±۰/۰۶	۰/۵۰a	±۰/۰۷
S 0.5	۹۱/۲۶cd	±۰/۸۹	-۰/۹۱a	±۰/۴۷	۳/۴۷ab	±۰/۰۹	۲/۵۵ab	±۱/۳۸
S 1	۸۹/۴۴bcd	±۱/۰۵	۰/۳۸b	±۰/۹۰	۵/۴۹b	±۱/۷۵	۵/۴۰b	±۲/۲۰
S 1.5	۸۷/۴۷bcd	±۲/۶۸	۱/۳۲bc	±۰/۴۸	۸/۳۷c	±۱/۰۷	۹/۰۹c	±۲/۴۵
S 2	۸۲/۵۲a	±۶/۱۷	۳/۵۲e	±۱/۰۲	۱۴/۶۶d	±۲/۲۱	۱۴/۰۷d	±۲/۰۱
SC 1	۸۶/۰۶ab	±۰/۷۰	۱/۶۱d	±۰/۲۸	۹/۶۵c	±۰/۵۵	۱۱/۱۷c	±۰/۸۶
SC 2	۸۶/۸۰abc	±۰/۶۴	۲/۲۶d	±۰/۲۱	۸/۹۷c	±۱/۳۲	۱۰/۷۹c	±۲/۰۶
SC 3	۸۷/۶۸bcd	±۱/۱۸	۳/۵۶e	±۰/۵۰	۸/۵۷c	±۱/۳۲	۹/۱۳c	±۱/۶۳

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

در مجموع می‌توان گفت فیلم‌های نانویی خواص مقاومت در مقابل گرما و مقاومت مکانیکی را بهبود می‌بخشند و سرعت انتقال گازها را کمتر می‌کنند. فیلم‌های نانویی با خواص آنتی‌باکتریال خود نسبت به فیلم‌های معمولی به دلیل وجود ذرات نقره و همچنین عبورپذیری کمتر در برابر اکسیژن و بخار آب به دلیل ذرات رس، در نگهداری از مواد غذایی بسته‌بندی شده، افزایش ماندگاری و جلوگیری از بیات شدن محصولاتی مانند نان، نقش قابل توجهی دارند. ذرات نانو نقره با خاصیت ضدمیکروبی خود از رشد کپک‌ها و میکروب‌ها جلوگیری کرده و با ایجاد محیط ضدمیکروبی، خواص ارگانولپتیک را بهبود می‌بخشند. به‌کار بردن ذرات نانو رس با لایه‌های نازک نانومتری که ساختاری صفحه مانند دارند سبب افزایش سختی داخلی نمونه و در نتیجه باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش عبورپذیری فیلم‌ها می‌شود. این رفتار را می‌توان ناشی از این حقیقت دانست که افزایش میزان پراکندگی ذرات رس موجب افزایش سطح المان‌های ویژه تقویت‌کننده‌ای است که سطح ویژه‌ای در حدود ۷۰۰ متر مربع بر گرم دارند؛ این سطح بر خواص نهایی کامپوزیت به شدت تأثیرگذار است. در واقع پراکندگی بیشتر ذرات رس به نحوی نشانگر ایجاد تعداد بسیار زیاد المان‌های تقویت‌کنندهٔ منفرد است. بهبود خواص مکانیکی، کاهش عبورپذیری و خروج بخار آب از بسته‌ها، به حفظ تازگی مواد غذایی بسته‌بندی شده کمک کرده و باعث افزایش ماندگاری آنها می‌شود (Sattari Najaf Abadi *et al.*, 2009).

نتیجه‌گیری

با به‌کار بردن ذرات نانویی در فیلم LDPE، مدول الاستیسیته به طور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد. در میان فیلم‌های موجود، فیلم نانویی ترکیبی شماره ۲ (SC3)، بیشترین مقدار مدول الاستیسیته و فیلم شاهد (W) کمترین مقدار را داراست. به‌کاربردن مواد نانویی، مدول الاستیسیته را ۱/۵ تا ۱/۹ برابر افزایش می‌دهد. همچنین اثر نوع فیلم بر مدول الاستیسیته در سطح ۰/۹۹ معنادار است.

به‌کار بردن ذرات نانویی در فیلم LDPE، مقاومت کششی را ۱/۴ تا ۲/۱ برابر افزایش می‌دهد. در بین فیلم‌های موجود، بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به فیلم نانویی ترکیبی شماره ۳ (SC3) و کمترینِ آن مربوط به فیلم شاهد است. اثر نوع فیلم بر مقاومت کششی در سطح ۰/۹۹ معنادار است.

با به‌کار بردن ذرات نانویی، درصد کشیدگی تا پاره شدن کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار میزان کشیدگی مربوط به فیلم شاهد (W) و کمترین مقدار مربوط به فیلم نانویی ترکیبی شماره ۳ (SC3) است. اثر انواع فیلم‌های نانویی بر درصد میزان کشیدگی تا پاره شدن در سطح ۰/۹۵ معنادار است. به‌کاربردن مواد نانویی، درصد کشیدگی تا پاره شدن را ۱/۴ تا ۲/۰ برابر کاهش می‌دهد.

با به‌کار بردن مواد نانویی در فیلم LDPE، میزان چغرمگی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار چغرمگی مربوط به فیلم شاهد (W) و کمترینِ آن مربوط به فیلم نانو نقره ۲ درصد (S2) است. به‌کاربردن مواد نانویی، چغرمگی را ۱/۳ تا ۴/۲ برابر کاهش می‌دهد. اثر نوع فیلم بر چغرمگی در سطح ۰/۹۵ معنادار است.

با به کار بردن مواد نانو کامپوزیتی درفیلم LDPE، مقاومت در برابر رشد پارگی به طور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد. در میان فیلم‌های موجود، فیلم نانویی ترکیبی شماره ۳ (SC3)، بیشترین مقاومت را در برابر رشد پارگی و فیلم شاهد (W)، کمترین مقاومت را در برابر رشد پارگی دارد. به‌کاربردن مواد نانویی، مقاومت در برابر رشد پارگی را ۲/۵ تا ۴/۱ برابر افزایش می‌دهد و اثر نوع فیلم بر مقاومت در برابر رشد پارگی در سطح ۰/۹۹ معنادار است.

با بررسی سه عامل رنگی و به دست آوردن اختلاف رنگ کلی فیلم‌ها (ΔE)، مشخص شد که فیلم نانو نقره ۲ درصد (S2) در مقایسه با سایر فیلم‌ها رنگ بیشتری دارد. کمترین اختلاف رنگ کلی مربوط به فیلم شاهد است. اختلاف رنگ کلی در فیلم‌های نانو نقره، با افزایش درصد نقره افزایش می‌یابد، ولی در فیلم‌های ترکیبی با افزایش درصد رس، کاهش نشان می‌دهد.

در مجموع، فیلم نانویی ترکیبی SC3 (۵۰۰ قسمت در میلیون نقره- ۴۵۰ قسمت در میلیون رس)، در مقایسه با سایر فیلم‌ها از نظر خواص مکانیکی در سطحی قابل قبول‌تر قرار دارد؛ مشکل عمده‌ای که دارد رنگ تیرهٔ آن به دلیل وجود ذرات رس است که ممکن است برای بسته‌بندی برخی مواد غذایی (که رنگ بسته نقش مهمی دارد) مناسب نباشد. در چنین مواردی، فیلم‌های نانویی ترکیبی با درصد کمتر می‌تواند به‌کار برده شود.

با توجه به اینکه هزینه ساخت فیلم‌های حاوی ذرات نانو نقره، ۱/۱ تا ۱/۳ و هزینهٔ ساخت فیلم‌های نانویی ترکیبی ۱/۱ تا ۱/۲ برابر فیلم‌های معمولی است (Sattari Najaf Abadi *et al.*, 2009)، به نظر می‌رسد که صرفهٔ اقتصادی استفاده از فیلم‌های نانویی در بسته‌بندی مواد غذایی مانند نان، که زمان فساد آن را ۴۰ تا ۶۰ درصد به تأخیر می‌اندازد، به مراتب بیشتر از هزینهٔ ساخت آنهاست. بنابراین استفاده از فیلم‌های نانویی ساخته و بررسی شده در این پژوهش می‌تواند حرکتی مفید در جهت کاهش ضایعات محصولات کشاورزی باشد.

از جمله کاری شدنی در بهبود کیفیت فیلم‌های نانویی از بین بردن رنگ تیرهٔ آن دسته از فیلم‌هایی است که دارای ذرات نقره و رس با درصد بالا هستند. همچنین به‌کار بردن روش‌های بهینه ساخت برای حفظ ضخامت یکسان فیلم در تمام نقاط، به بهتر شدن ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های نانویی کمک می‌کند.

قدردانی

از سرکار خانم چاووشی که در تهیه و ساخت فیلم‌های نانویی همکاری کرده‌اند و نیز از دیگر همکارانی که در مراحل مختلف آزمایش یاری رسان بودند، سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Anon. 1989a. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. Method D882-88. American Society for Testing and Materials. Philadelphia. PA.

Anon. 1989b. Standard test method for Tensile Strength properties of thin plastic sheeting. Method D1922. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA.

Anon. 2007. Anti bacterial Packaging advantages. http://www.nanocid.com. (in Farsi)

Cao, G., and Chen, X. 2008. Size dependence and orientation dependence of elastic properties of ZnO nanofilms. Inter. J. Solids. Struc. 45, 1730-1753.

Laidani, N., Micheli, V., Bartali, R., Gottardi, G. and Anderle, M. 2008. Optical and mechanical characterization of zirconia–carbon nanocomposite films. Thin Solid Films. 516, 1553-1557.

Li Ji A. B., Hongxuan Li, A., Fei Zhao, A. B., Jianmin Chen, A. and Zhou, H. 2008. Microstructure and mechanical properties of Mo/DLC nanocomposite films. Diamond & Related Materials J. 17(11): 1949-1954.

Lotti, C., ISAAC Claudia, S., Branciforti Marcia, C., Alves Rosa, M. V., Liberman Susana., Bretas Rosario E. S. 2008. Rheological, mechanical and transport properties of blown films of high density polyethylene nanocomposites. European Polymer J. 44, 1346-1357.

Mararu, J. C. and Haung, Q. 2005. Nanotechnology: a new frontier in food science. Agro Food industry hi-tech. 16(6).

Misjak, F., Barna, P, B., Toth, A, L. Ujvari, T. Bertoti, I. and Radnoczi, G. 2008. Structure and mechanical properties of Cu-Ag nanocomposite films. Thin Sold Films. 516(12): 3931-3934.

Mohsenin. N. N. 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Pub. New York.

Sattari Najaf Abadi, M., Minaee, S., Azizi, M. H and Afshari, H. 2009. Effect of application of nano technology and nano packaging on reduction of lesses of food products and its risks. 5th Scientific and Researching Congress of Gilan University Agricultural Students. (in Farsi)

Sattari Najaf Abadi, M., Minaee, S., Azizi, M. H. and Afshari, H. 2009. Effect of application of nano films maked in country on bread staling with shear test method. 5th Student Congress of Nano Technology. Tehran. (in Farsi)

Tajeddin, B. 2003. Prevention food materials loss with suitable packaging. Prevent from bread and food materials loss. (in Farsi)

Viviana, P., Cyras. A., Liliana, B., Manfredi, A., Minh-Tan Ton-That, B., Analı, A. and Zquez, V. 2008. Physical and mechanical properties of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposite films. Carbohydrate Polymers.73(1): 55-63.

Wang, Y., Zhang, X., Wu, X., Li, Q., Zhang, H. and Zhang, X. 2008. Structural and mechanical properties of nc-TiC/a-C:H nanocomposite film prepared by dual plasma technique. Mater. Sci. Eng. 488(1-2):112-116.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.11/No.2/2010/P: 59-72*

Mechanical Properties of Silver-Clay Nanofilms for Food Packaging

S. Minaee, M. Sattari Najaf Abadi*, M. H. Azizi and H. Afshari

* Corresponding Author: M. Sc. Graduate. Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14115-336, Tehran, Iran. Email: sattari.utm@gmail.com

In this research, the mechanical properties of seven types of nanofilm with differing amounts of silver and silver-clay particles were studied. The elasticity of modulus, tensile strength, toughness, elongation at break, tear strength and color of nanofilms were compared with those of ordinary LDPE film. Results showed that the inclusion of nano particles increased the modulus of elasticity, tensile strength and tear strength 1.1 to 2.5 times. However, elongation at break point and toughness of the films decreased 1.4 to 4 times. The effect of film type on modulus of elasticity, tensile stress and tear strength was significant at the 0.01 level and for elongation at break point and toughness was significant at the 0.05 level. An investigation of film color parameters and ΔE showed that the 1000 ppm nano silver film had more color than the other films. The smallest ΔE was for the control film. The ΔE value of the nano silver films increased as nano particle content increased and, in nano composite films, decreased as clay content increased. Overall, the nano film with 1000 ppm nano silver content was the best film and the control film was the worst. In conclusion, the nano composite film (SC3) with 500 ppm nano silver and 450 ppm nano clay content was the best film in terms of its mechanical properties. The dark color of this film, however, is an undesirable aspect for food packaging. This may be alleviated by color-removing procedures or by use of the films with lower nano particle content.

Key words: Food Packaging, Mechanical Properties, Nano Technology