

Comparison of the effect of adding different nanoparticles on the physical and mechanical properties of the protein film extracted from lantern fish

Azam Siyamiyan¹, Seyed Mahdi Ojagh^{*2}, Mehdi Abdollahi³, Alireza Alishahi⁴

1. Ph.D. Student of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: azam.siamian91@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran & Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ojagh@ut.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Biology and Biological Engineering Food and Nutrition Science, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. E-mail: abdollahi.mkh@gmail.com
4. Associate Prof., Dept. of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: seafood1144@yahoo.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 11.01.2023
Revised: 11.08.2023
Accepted: 11.12.2023

Keywords:
Lantern fish,
Nano-Bacterial Cellulose,
Nano-Chitosan,
Nano-Clay,
Nano-Titanium dioxide

ABSTRACT

In this research, the comparison of the effect of adding nanoparticles (Clay (Cl), Chitosan (Ch), Titanium dioxide (TiO₂) and Bacterial Cellulose (BC)) separately on the physical, mechanical and optical properties of the film prepared from the lantern fish protein was investigated. To prepare nanocomposite films, nanoparticles were added separately at 1 and 3% levels to the protein film solution extracted from the lantern fish. The results showed that by adding nanoparticles in the polymer substrate, the tensile strength of all films showed a significant increase. Elongation at breaking point in films containing nanoparticles of Cl, TiO₂ and BC increased significantly and the water vapor permeability improved in films containing nanoparticles (Cl, BC and TiO₂). The moisture content of the films increased with the addition of nanoparticles and the solubility values showed a significant also increase in the rest of the films containing nanoparticles, except for BC nanoparticles. The opacity of the films also increased with the addition of nanoparticles.

Cite this article: Siyamiyan, Azam, Ojagh, Seyed Mahdi, Abdollahi, Mehdi, Alishahi, Alireza. 2024. Comparison of the effect of adding different nanoparticles on the physical and mechanical properties of the protein film extracted from lantern fish. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 12 (4), 37-50.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/japu.2023.21871.1830

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

مقایسه تأثیر افزودن نانوذرات مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم پروتئینی استخراج شده از فانوس ماهی

اعظم صیامیان^۱، سید مهدی اجاق^{۲*}، مهدی عبدالمهی^۳، علیرضا عالیشاهی^۴

۱. دانشجوی دکتری فراوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: azam.siamian91@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه فراوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران و گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ojagh@ut.ac.ir
۳. استادیار گروه زیست‌شناسی و مهندسی بیولوژیک علوم غذایی و تغذیه، دانشگاه صنعتی چالمرز، گوتنبرگ، سوئد. رایانامه: abdollahi.mkh@gmail.com
۴. دانشیار گروه فراوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: seafood1144@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	در این پژوهش، مقایسه تأثیر افزودن نانوذرات (رس، کیتوزان، تیتانیوم دی‌اکسید و سلولز باکتریایی) به صورت جداگانه بر خواص فیزیکی، مکانیکی و ظاهری فیلم تهیه شده از پروتئین فانوس ماهی مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیت، نانوذرات به صورت مجزا در دو سطح ۱ و ۳ درصد به محلول فیلم پروتئین استخراج شده از فانوس ماهی اضافه شدند. نتایج نشان داد با افزودن نانوذرات در بستر پلیمر، مقاومت کششی در همه فیلم‌ها افزایش قابل توجهی نشان داد. ازدیاد طول در نقطه شکست در فیلم‌های حاوی نانوذرات رس، تیتانیوم دی‌اکسید و سلولز باکتریایی به شکل معنی‌دار افزایش یافت و میزان نفوذپذیری به بخار آب در فیلم‌های حاوی نانوذرات (رس، سلولز باکتریایی و تیتانیوم دی‌اکسید) بهبود یافت. همچنین رطوبت فیلم‌ها با افزودن نانوذرات افزایش و مقادیر حلالیت نیز به جز در مورد نانوذرات سلولز باکتریایی در بقیه فیلم‌های حاوی نانوذره افزایش قابل توجه نشان داد. کدورت فیلم‌ها نیز با افزودن نانوذرات افزایش یافت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱	
واژه‌های کلیدی: فانوس ماهی، نانو تیتانیوم دی‌اکسید، نانورس، نانو سلولز باکتریایی، نانوکیتوزان	

استاد: صیامیان، اعظم، اجاق، سید مهدی، عبدالمهی، مهدی، عالیشاهی، علیرضا (۱۴۰۲). مقایسه تأثیر افزودن نانوذرات مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم پروتئینی استخراج شده از فانوس ماهی. نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان، ۱۲ (۴)، ۵۰-۳۷.

DOI: 10.22069/japu.2023.21871.1830



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

برابر اکسیژن، بسیاری از پژوهش‌گران را به مطالعه فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی براساس پروتئین‌های مختلف برانگیخته است (۸).

از میان انواع پروتئین، پروتئین میوفیبریل ماهی می‌تواند برای تهیه فیلم‌هایی با شفافیت و استحکام خوب استفاده شود، زیرا پروتئین‌های میوفیبریل توانایی تشکیل زمینه پیوسته‌ای را در طی خشک شدن فیلم دارند (۹). در مقایسه با فیلم‌های مصنوعی، فیلم‌های تهیه شده از پروتئین میوفیبریل به نسبت از خواص مکانیکی ضعیف‌تری برخوردارند (۱۰). از این‌رو از ذرات نانو برای بهبود خواص عملکردی فیلم‌ها استفاده می‌شود (۹). ادغام پرکننده‌های با اندازه نانو برای تولید نانوکامپوزیت زیستی، مسیری امیدوارکننده برای افزایش خواص مکانیکی، حرارتی و ممانعتی پلیمر زیستی نشاسته است (۱۱).

فناوری نانو در صنعت بسته‌بندی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. بیش‌ترین کاربرد این فناوری استفاده از ترکیبات نانو در ایجاد تغییرات مطلوب در فیلم‌های مورد استفاده در بسته‌بندی است. این ترکیبات باعث بهبود (خواص فیزیکی) ممانعت‌کننده از تبادل گازی (خواص بیوشیمیایی) سازگاری با محیط زیست و تجزیه‌پذیری (خواص عملکردی) خواص ضد میکروبی، جذب اشعه فرابنفش، آنتی‌اکسیدانی و هم‌چنین بهبود تازگی، طعم و بو ماده غذایی و تولید سنسورهای هوشمند برای تشخیص فساد در ماده غذایی می‌شوند (۱۲).

نانوذرات کیتوزان که از یک ماده طبیعی با خواص فیزیکوشیمیایی عالی تشکیل شده‌اند، سازگار با محیط زیست و زیست‌فعال هستند (۱۳). سلولز یکی از فراوان‌ترین مواد زیست‌تخریب‌پذیر در طبیعت است که به‌طور معمول از گیاهان استخراج می‌شود. سلولز باکتریایی توسط میکروارگانیسم‌های مختلف از جمله گلوکونوباکتر تولید می‌شود (۱۴). نانوسلولز باکتریایی،

بسته‌بندی یک فناوری ضروری برای افزایش ماندگاری مواد غذایی، کاهش خطر آسیب محصولات و فساد مواد غذایی است که محصولات غذایی را قادر می‌سازد با بهداشت عالی، مواد مغذی را حفظ (۱) و بر اولین برداشت مصرف‌کننده از یک محصول غذایی تأثیر می‌گذارد. سه هدف اصلی بسته‌بندی حفاظت، انتقال اطلاعات و حمل و نقل را دنبال می‌کند (۲). برای رسیدن به این هدف بسته‌بندی مواد غذایی باید ضمن این‌که مقاوت مکانیکی مطلوبی داشته باشد، بسته به نوع محصول نفوذپذیری بسیار کمی در مقابل بخار آب، اکسیژن و نور نیز داشته باشد (۳).

علی‌رغم این‌که بسته‌بندی‌های پلاستیکی تولید شده از مواد پتروشیمی، ویژگی‌های ترکیبی عالی مانند استحکام کششی خوب، انعطاف‌پذیری، پایداری، نفوذناپذیری و تولید قابل تحقق در مقیاس بزرگ دارند (۴) و مواد ایده‌آلی برای بسته‌بندی محصولات مختلف هستند، اما کم‌تر قابل استفاده مجدد و غیرقابل تجزیه زیستی هستند، که باعث می‌شود در محیط باقی بمانند و تهدیدهای زیست‌محیطی را ایجاد کنند (۱ و ۵). از این‌رو، توسعه مواد زیست‌تخریب‌پذیر سازگار با محیط زیست از منابع طبیعی ضروری است. مواد زیستی تجزیه‌پذیر با آلودگی محیطی کم و زیست‌سازگاری عالی نسبت به پلیمرهای پلاستیکی معمولی که از طریق صنایع شیمیایی سنتز می‌شوند، مزیت برجسته‌تری در بسته‌بندی مواد غذایی دارند (۶). انتظار می‌رود مواد زیست‌توده، که از حیوانات، گیاهان طبیعی و میکروارگانیسم‌ها مشتق می‌شوند، جایگزین مواد بسته‌بندی غیرقابل تجزیه سنتی به دلیل مشتق شدن طبیعی و زیست‌سازگاری آن‌ها شوند (۷). مواد زیست‌توده عمدتاً به پلی‌ساکاریدها، لیپیدها و پروتئین‌ها تقسیم می‌شوند. پروتئین‌ها به دلیل توانایی قوی در تشکیل فیلم، شفافیت و خاصیت ممانعتی در

بر خلاف سلولز گیاهی، عاری از لیگنین و همی سلولز است، بنابراین یک ماده زیستی غیرحساسیت‌زا، غیرسمی، زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار است (۱۵). این دسته از سلولزها از لحاظ شیمیایی با سلولز گیاهی یکسان هستند اما خواص مکانیکی، بلورینگی و تخلخل، سازگاری زیستی و توانایی نگهداری آب بالاتری نسبت به سلولزهای گیاهی دارند (۱۶). نانوسلولز اگر به خوبی پراکنده شود می‌تواند ویژگی‌های پلیمری متعددی از جمله ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی، مانع و ترشوندگی سطحی را بهبود بخشد. همچنین می‌تواند آزادسازی ترکیب فعالی را که ممکن است برای ارزش افزوده در پلیمر زیستی گنجانده شود، کنترل کند (۱۷).

مونت موریلونیت یکی از متداول‌ترین سیلیکات‌های لایه‌ای است که با یک بار سطحی منفی متوسط مشخص می‌شود که ساختار بلوری کاملی را نشان می‌دهد که توسط یک لایه دوبعدی تشکیل شده است که دارای یک صفحه هشت‌وجهی مرکزی از اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم است که با دو چهار وجهی سیلیس خارجی مرتبط شده است (۱۸). مونت موریلونیت می‌تواند به‌طور بالقوه برای کنترل انتشار ترکیبات ضد میکروبی از فیلم به محصول بسته‌بندی شده و همچنین کنترل جو داخلی بسته‌بندی، بسته به بهبود نفوذپذیری گاز و بخار آب کمک کند (۱۹). همچنین سبب افزایش مدول کششی در محتویات پرکننده تا ۱ درصد وزنی، پایداری حرارتی بالاتر و خواص مانع بهتر تا حد زیادی نشان داده شده است (۲۰).

تیتانیوم دی‌اکسید از اکسیدهای فلزی است که در زندگی روزمره کاربرد فراوانی دارد. این ماده پودر سفیدرنگی است که دارای سه فاز کریستالی آناتاز، روتایل و بروکیت است که از این‌بین، فاز آناتاز عملکرد بهتری در برابر نور نشان می‌دهد. ذرات

تیتانیوم دی‌اکسید از نظر شیمیایی غیرفعال است و در تماس با سایر مواد معمولی که در سیستم‌های پوشش‌دهی به کار می‌روند غیرقابل واکنش می‌باشد. نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل خواص منحصر به فرد خود مانند توانایی جذب نور، ثابت دی‌الکتریک بالا، پایداری شیمیایی، زیست‌سازگاری و غیرسمی بودن به‌عنوان پرمصرف‌ترین ماده در نظر گرفته می‌شوند (۲۱). بر این اساس، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید در پوشش و بسته‌بندی استفاده شده‌اند (۲۲).

وجدان و همکاران افزودن نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید به فیلم ژلاتین-آگار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزودن تیتانیوم دی‌اکسید به بستر کامپوزیت نفوذپذیری به بخار آب را بهبود می‌بخشد (۲۳). همچنین افزودن مقادیر نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید به ایزوله پروتئین آب پنیر، سبب بهبود مقاومت کشش و نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌ها شد (۲۴). هه و همکاران مشاهده کردند، افزودن نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید به ژلاتین سبب استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست فیلم‌ها در حالی که نفوذپذیری به بخار آب آن‌ها را کاهش داد. اندازه‌گیری‌های فاکتورهای نور نیز نشان داد که این فیلم‌ها بسیار شفاف هستند و در عین حال دارای خواص ممانعتی عالی در برابر نور UVC هستند (۲۵). در مطالعات پژوهش‌گران پیرامون افزودن نانوذرات کیتوزان، خواص حرارتی و مکانیکی فیلم‌های هیدروکسی پروپیل متیل سلول را افزایش و نفوذپذیری بخار آب را کاهش داد (۲۶). همچنین گزارش شده باعث بهبود قابل توجه خواص مکانیکی شده و در کاهش نرخ نفوذپذیری به بخار آب در فیلم‌های پوره موز عمل می‌کند (۲۷) و مقاومت کشش، نفوذپذیری به بخار آب و حلالیت فیلم‌های ژلاتین ماهی را بهبود بخشید (۲۸). افزودن نانوسلولز به کازئینات سدیم سبب بهبود خواص مکانیکی و

(مونت موریلونیت)، کیتوزان، تیتانیوم دی‌اکسید و نانوسلولز باکتریایی) به نسبت ۱ و ۳ درصد وزن خشک پروتئین به ۲۰ سی‌سی آب مقطر اضافه سپس بر روی همزن مغناطیسی به مدت ۲ ساعت هم‌وزن و سپس ۵ دقیقه توسط دستگاه التراسونیک هم‌وزن گردید. محلول حاوی نانو ذرات سپس به درون محلول پروتئین ریخته شد و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق توسط دستگاه التراسونیک هم‌وزن گردید. سپس گلیسرول به‌عنوان نرم‌کننده به نسبت ۳۵ درصد میزان پروتئین خشک مصرف شده در محلول فیلم، به محلول فیلم اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای اتاق توسط دستگاه همزن مغناطیسی هم‌وزن گردید. سپس محلول فیلم آماده شده حاوی نانوذرات درون پلیت پلاستیکی ریخته شد و در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت درون آن خشک گردید. فیلم‌های خشک شده جهت انجام آزمون‌های بعدی از پلیت‌ها جدا و درون پلاستیک‌های زیپ‌دار و دسیکاتور قرار داده شدند.

سنجش ضخامت و خواص مکانیکی فیلم‌ها: ضخامت فیلم‌ها با یک ریزسنج دیجیتالی (۰/۰۰۱ میلی‌متر، Mytutoyo ساخت ژاپن) و در پنج نقطه از هر نمونه تکرار شد و میانگین آن در تعیین مقاومت کششی و نفوذپذیری به بخار آب استفاده گردید. آزمایش‌های کشش با استفاده از دستگاه تجزیه و تحلیل بافت (TexVol, Swiss) انجام گرفت. قبل از انجام آزمایش‌های کشش تمامی نمونه‌ها از نظر رطوبتی تعدیل گردیدند. فیلم‌ها به شکل مستطیل به ابعاد $2/5 \times 10$ سانتی‌متر مربع بریده شدند. فاصله بین دو فک دستگاه ۵ سانتی‌متر و سرعت حرکت فک‌ها ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. فاکتورهای شامل مقاومت کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست مطابق روش شماره D882-01 مصوب ASTM به دست آمدند (۳۵).

نفوذپذیری به آب شد (۲۹). نفوذپذیری به بخار آب و مقاومت کشش فیلم آگار بهبود یافت (۳۰). افزودن نانوسلولز تا ۳ درصد به پلیمر آگار باعث افزایش مقاومت کشش و ازدیاد طول در نقطه شکست شد و رطوبت، حلالیت و نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌ها با افزایش نانوذرات کاهش معنی‌دار نشان داد (۳۱). مطالعات پیرامون افزودن نانورس به صمغ دانه شنبلیله، مقاومت کشش و نفوذپذیری به بخار فیلم‌ها را بهبود و رطوبت فیلم‌ها را کاهش داد (۳۲). افزودن نانورس سبب بهبود خواص مکانیکی، رطوبت، حلالیت و نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌های بر پایه ژلاتین شده است (۳۳). مونت موریلونیت در فیلم ژلاتین سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی، جذب آب و نفوذپذیری به بخار آب شده است (۳۴).

با توجه به این‌که فانوس ماهی به عنوان یک منبع ماهی کم‌مصرف با داشتن پروتئین ارزشمند در کشور ما تبدیل به پودر ماهی به جهت استفاده در خوراک دام و طیور می‌شود و هیچ پژوهش‌گری بر روی فیلم پروتئینی استخراجی از فانوس ماهی پژوهشی انجام نداده است، هم‌چنین پژوهش‌گران از نانوذرات رس، کیتوزان، تیتانیوم دی‌اکسید و سلولز به‌صورت مجزا در تولید نانوکامپوزیت‌ها استفاده کرده‌اند ولی مقایسه‌ای بین این نانوذرات انجام نشده است. در این مطالعه سعی شده تأثیر نانوذرات مختلف بر روی فیلم پروتئینی فانوس ماهی مطالعه و بهترین نانو ذره از نظر بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی جهت استفاده در صنعت بسته‌بندی انتخاب گردد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش پروتئین میوفیبریل ماهی طی چند مرحله شست‌وشوی گوشت چرخ شده ماهی به روش تغییر pH استخراج شد و محلول ۲ درصد آن تولید و سپس هر کدام از چهار نانو ذره (رس

شد و سپس در ظروف حاوی ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفت. ظروف به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق ۲۵ درجه در جای ثابت قرار داده شد. پس از این مدت نمونه‌ها به وسیله کاغذهای صافی که قبلاً خشک شده بود فیلتر و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید (۳۸). میزان حلالیت فیلم‌ها به کمک رابطه ۵ محاسبه گردید.

$$(۵) \quad ۱۰۰ \times \text{وزن ماده خشک اولیه موجود در فیلم} / \text{وزن فیلم خشک پس از غوطه‌وری} - \text{وزن ماده خشک اولیه} = \text{درصد حلالیت}$$

سنجش رنگ سطحی و کدورت و انتقال نور فیلم‌ها: ابتدا دستگاه توسط کاشی مخصوص کالیبره و سپس نمونه‌های فیلم بر روی صفحه استاندارد سفید شدند. سپس پارامترهای رنگ مانند L^* (روشنایی)، a^* (قرمزی-سبزی) و b^* (آبی-زردی) برای هر نمونه با در نظر گرفتن ۵ نقطه به صورت تصادفی در هر تکرار به وسیله دستگاه رنگ‌سنج^۳ قرائت شد. ΔE (اختلاف رنگ کل)، بعد از کسر اختلاف بین پارامترهای L^* ، a^* و b^* از صفحه استاندارد سفید، به وسیله رابطه زیر محاسبه شد (۳۷).

$$\text{اختلاف رنگ فیلم‌ها} = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad (۶)$$

$$\text{شاخص سفیدی} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (۷)$$

به منظور سنجش میزان کدورت فیلم‌ها و انتقال نور نمونه‌های فیلم به ابعاد ۹×۴۰ میلی‌متر در درون سلول‌های اسپکتروفتومتری قرار گرفت و به منظور

$$(۱) \quad \text{مقاومت کششی} = \frac{\text{حداکثر نیرو در لحظه پاره شدن}}{\text{عرض فیلم} \times \text{ضخامت فیلم}}$$

$$(۲) \quad \text{درصد ازدیاد طول} = \frac{\text{ازدیاد طول در نقطه شکست} \times ۱۰۰}{\text{فاصله بین دو فک دستگاه}}$$

اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری فیلم‌ها در برابر بخار آب (WVTR): سنجش میزان نفوذپذیری فیلم‌ها نسبت به بخار آب طبق روش شماره E96 مصوب ASTM صورت گرفت (۳۶). درون سلول‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری^۲، آب ریخته و سپس سطح سلول به وسیله فیلم پوشانده و سلول‌ها درون دسیکاتور حاوی سلیکاژل قرار گرفتند. تغییرات وزن سلول‌ها طی زمان با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت $۰/۰۰۰۱$ گرم اندازه‌گیری شد. نرخ انتقال بخار آب از رابطه ۳ حاصل شد.

$$(۳) \quad \text{نرخ انتقال بخار آب} = \frac{\text{شیب خط}}{\text{سطح سلول}}$$

سنجش میزان رطوبت و حلالیت در آب: نمونه‌ها با اندازه $۲/۵ \times ۲/۵$ سانتی‌متر مربع و وزن مشخص درون پلیت‌های شیشه‌ای که از قبل به تعادل رطوبتی رسیده و توزین شده بودند قرار گرفت. سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. نمونه همراه با پلیت پس از این مدت خارج شده و پس از سرد شدن در دسیکاتور مجدداً توزین گردید. محتوای رطوبت روکش‌ها بر پایه وزن مرطوب از رابطه ۴ محاسبه گردید (۳۷).

$$(۴) \quad \text{وزن نمونه مرطوب} / (\text{وزن آب} \times ۱۰۰) = \text{درصد رطوبت بر مبنای وزن مرطوب}$$

وزن اولیه نمونه‌های فیلم $۲/۵ \times ۲/۵$ سانتی‌متر مربع پس از خشک شدن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تعیین

3- Loviband CAM-System 500

1- Water Vapor Transmission Rate (WVTR)
2- Diffusion cell

نتایج

نانوذرات (رس، کیتوزان، تیتانیوم دی اکسید و سلولز باکتریایی) با دو مقدار ۱ و ۳ درصد به فیلم پروتئینی اضافه شد و فیلم‌ها از نظر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ظاهری مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده به شرح زیر گزارش شد. ضخامت فیلم‌ها: همان‌طور که در (جدول ۱) مشاهده می‌شود ضخامت فیلم فاقد نانوذره ۰/۰۹۷ بوده که با افزودن نانوذرات به‌طور کلی افزایش معنی‌دار ($P < 0/05$) در ضخامت نانوکامپوزیت‌ها مشاهده شد. بیش‌ترین ضخامت ۰/۱۶۸ میلی‌متر و مربوط به فیلم حاوی ۳ درصد نانوسلولز بوده است. پس از نانوسلولز بیش‌ترین ضخامت‌ها به‌ترتیب در فیلم‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید و کیتوزان بوده است. افزودن نانوذرات رس تغییر قابل‌توجهی در ضخامت فیلم‌ها ایجاد نکرده است. که با نتایج حسینی و همکاران با افزودن نانوذرات کیتوزان به ژلاتین ماهی (۲۸)، نتایج حاصل از پژوهش‌های وجدان و همکاران پیرامون افزودن تیتانیوم دی اکسید به فیلم آگار- ژلاتین (۲۳)، ضخامت افزایش یافت همخوانی دارد.

سنجش میزان عبور نور در طول موج‌های ۶۰۰-۲۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسکن گردید. هم‌چنین به‌منظور محاسبه میزان شفافیت فیلم‌ها از رابطه ۸ استفاده گردید.

$$\text{ضخامت فیلم} / \text{میزان جذب در } 600 \text{ نانومتر} = \text{کدورت فیلم} \quad (8)$$

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ انجام شد. ابتدا بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون (کولموگراف- اسمیرنوف^۱) و سپس همگنی واریانس داده‌ها با آزمون (لون^۲) انجام گردید. جهت مقایسه آماری ویژگی‌های فیلم و تجزیه و تحلیل مقادیر کمی به‌دست‌آمده از آنالیزهای شیمیایی از تجزیه واریانس یک‌طرفه آنووا^۳ در قالب آزمون دانکن استفاده شد. تمامی نتایج به‌صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه گردید و مقایسه‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام پذیرفت.

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم‌های پروتئینی حاوی مقادیر مختلف از نانوذرات.

نوع فیلم	ضخامت (میلی‌متر)	رطوبت (درصد)	حلالیت (درصد)	نفوذپذیری به بخار آب	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	افزایش طول (درصد)
شاهد	۰/۰۹۷/۰۰۸ ^a	۱۸/۰±۱۲/۵۳ ^a	۴۴/۱±۰/۶۴ ^b	۵/۰±۸/۶ ^c	۲/۰±۶۳/۱۹ ^e	۳۰/۲±۲۶/۰۵ ^f
رس ۱ درصد	۰/۰۹۷/۰۰۸ ^a	۲۳/۰±۵۵/۷۳ ^c	۴۹/۰±۳۱/۵۸ ^{cd}	۴/۰±۸۳/۶۹ ^{bc}	۳/۰±۰۵/۳۲ ^{cde}	۴۴/۳±۳۵/۷۷ ^c
رس ۳ درصد	۰/۰۹۸±۰/۰۴ ^a	۲۲/۰±۴۲/۹۳ ^{bc}	۴۷/۱±۷۰/۰۱ ^c	۳/۱±۵۱/۳۹ ^{ab}	۴/۰±۰۶/۷۷ ^b	۵۷/۵±۳۲/۲۵ ^d
کیتوزان ۱ درصد	۰/۰±۱۰۲/۰۱۱ ^{ab}	۲۳/۱±۹۰/۱۷ ^c	۴۹/۱±۳۹/۱۷ ^{cd}	۹/۱±۲۷/۲۴ ^d	۲/۰±۹۲/۲ ^{de}	۱۲/۱±۶۹/۳۲ ^e
کیتوزان ۳ درصد	۰/۰±۱۰۴/۰۰۷ ^{ab}	۲۳/۱±۷۸/۳۶ ^c	۵۱/۲±۸۱/۶۶ ^d	۶/۱±۹۱/۴۹ ^c	۲/۰±۹۶/۱۷ ^{de}	۱۵/۱±۷۲/۳۳ ^e
تیتانیوم دی اکسید ۱ درصد	۰/۰±۱۱۶/۰۱۱ ^{bc}	۲۳/۲±۰۵/۲۴ ^{bc}	۴۲/۲±۳۲/۳۶ ^b	۴/۱±۸۲/۶۴ ^{bc}	۳/۰±۷۱/۴۵ ^{bc}	۷۱/۲±۰۳/۵۸ ^c
تیتانیوم دی اکسید ۳ درصد	۰/۰±۱۲۶/۰۰۹ ^c	۲۴/۱±۳۹/۱۶ ^c	۴۷/۱±۷۶/۲۵ ^c	۳/۱±۷۵/۵۶ ^{ab}	۴/۰±۰۳/۷۷ ^b	۸۵/۴±۴۸/۴۲ ^b
سلولز ۱ درصد	۰/۰±۱۲۷/۰۱۳ ^c	۲۱/۰±۱۳/۲۱ ^b	۳۴/۲±۶۸/۲۵ ^a	۲/۰±۵۸/۲ ^a	۳/۰±۳۹/۴۵ ^{bcd}	۴۲/۵±۷۴/۳۸ ^c
سلولز ۳ درصد	۰/۰±۱۶۸/۰۰۶ ^d	۲۰/۱±۹۳/۰۴ ^b	۳۲/۳±۴۱/۳۲ ^a	۲/۰±۰۶/۴۹ ^a	۷/۰±۳۵/۲۱ ^a	۹۱/۵±۵۶/۱ ^a

^{a, b, c} حروف کوچک در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح $P < 0/05$

- 1- Kolomogorav-Smirnov
- 2- Leven
- 3- ANOVA

اندازه‌گیری خواص مکانیکی فیلم‌ها (مقاومت کشش، افزایش طول): خواص مکانیکی به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم برای مواد بسته‌بندی، همواره در جنبه‌های بازاریابی و فرآوری محصولات مورد توجه قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی قوی می‌تواند مقاومت تنش مواد بسته‌بندی مواد غذایی را در جابجایی، حمل و نقل و نگهداری بهبود بخشد (۳۹). نتایج مقاومت کششی و درصد افزایش طول فیلم‌های تولیدی در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقاومت کششی فیلم با افزودن نانوذرات افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) داشت. به طوری که بیش‌ترین مقاومت کشش مربوط به فیلم حاوی ۳ درصد نانوسلولز با ۷/۳۵ مگاپاسکال و پس از آن به ترتیب مربوط به فیلم حاوی رس ۳ درصد با ۴/۰۶ مگاپاسکال و تیتانیوم دی‌اکسید ۳ درصد ۴/۰۳ مگاپاسکال و بوده است. کم‌ترین میزان مربوط به فیلم حاوی ۱ و ۳ درصد نانوذره کیتوزان به ترتیب ۲/۹۲ و ۲/۹۶ مگاپاسکال بوده است. افزودن نانوذرات به‌طور کلی باعث افزایش معنی‌دار میزان مقاومت کشش نانوکامپوزیت‌های زیستی شد.

درصد ازدیاد طول فیلم‌ها نیز با افزودن نانوذرات به‌جز کیتوزان به مقدار قابل‌توجهی ($P < 0.05$) افزایش یافت. به طوری که ازدیاد طول در فیلم فاقد نانوذره ۳۰/۲۶ بود که با افزودن ۱ و ۳ درصد نانوذرات کیتوزان به میزان ۱۲/۶۹ و ۱۵/۷۲ منجر به کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) در ازدیاد طول شد. به‌طورکلی بیش‌ترین افزایش طول مربوط به نانوکامپوزیت حاوی ۳ درصد نانوسلولز با ۹۱/۵۶ درصد بود و پس از آن به ترتیب ۳ و ۱ درصد نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید میزان ازدیاد طول در نقطه شکست را تا ۸۵/۴۸ و ۷۱/۰۳ افزایش داد. کم‌ترین میزان افزایش مربوط به نانوذرات سلولز ۱ درصد با ۴۲/۷۴ و نانوذرات رس ۱ درصد با ۴۴/۳۵ بوده است. که با نتایج از مطالعه دمتوس و همکاران با افزودن نانوذره تیتانیوم

دی‌اکسید به بستر فیلم ژلاتین افزایش مقاومت کشش و افزایش طول در نقطه شکست (۴۰) همخوانی داشت و افزودن نانوذرات سلولز به فیلم کازئینات سدیم (۲۹) و آگار (۳۰) و افزودن رس به صمغ دانه شنبلیله (۳۲) سبب بهبود خواص مکانیکی گردید.

اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری فیلم‌ها در برابر بخار آب: نفوذپذیری به بخار آب یکی از پارامترهای مهم برای پایداری رطوبت و ماندگاری مواد در نانوکامپوزیت‌ها و از مهم‌ترین ویژگی‌های عملکردی برای ارزیابی بسته‌بندی مواد غذایی است و مقدار آن در فیلم باید تا حد امکان پایین باشد. نفوذپذیری به بخار آب به پارامترهای مختلفی مانند ماهیت ماتریس پلیمری، مواد افزودنی، عامل فعال‌کننده، محتوای آب و ساختار و مورفولوژی لایه‌ها و نانوکامپوزیت‌ها وابسته است (۴۱). نتایج مربوط به نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌ها در جدول ۱ نشان می‌دهد که نفوذپذیری به بخار آب با افزودن نانوذرات تغییر معنی‌دار ($P < 0.05$) داشته است. نفوذپذیری به بخار آب به‌طور معنی‌داری از $5/8 \times 10^{-1} \times 10^{-1}$ پاسکال \times متر $^{-1}$ (ثانیه گرم) $\times 10^{-1}$ در فیلم فاقد نانوذره تا $2/06 \times 10^{-1} \times 10^{-1}$ پاسکال \times متر $^{-1}$ (ثانیه گرم) $\times 10^{-1}$ در فیلم حاوی ۳ درصد نانوسلولز کاهش یافت. این درحالی است که نفوذپذیری فیلم‌ها در حضور نانوکیتوزان افزایش یافت به گونه‌ای که بیش‌ترین نفوذپذیری به بخار آب به ترتیب در فیلم حاوی ۱ و ۳ درصد نانوکیتوزان به میزان $9/27$ و $6/91 \times 10^{-1} \times 10^{-1}$ پاسکال \times متر $^{-1}$ (ثانیه گرم) بوده است. افزودن نانو ذرات به‌جز نانوکیتوزان منجر به کاهش نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌های تولیدی گردید که با نتایج مطالعات دمتوس و همکاران افزودن نانوذرات به بستر فیلم ژلاتینی همخوانی داشت (۴۰). کاهش مقدار نفوذپذیری به بخار آب در پژوهش حاضر می‌تواند به دلیل تجمع نانوذرات (با افزایش غلظت) و به دنبال آن بسته شدن

میزان حلالیت در آب، یکی از مشخصه‌های کیفی مهم برای بسته‌بندی‌های استفاده شده در محصولات غذایی به‌شمار می‌آید. بیوپلیمر مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی باید کم‌ترین حساسیت به رطوبت را دارا باشد. در غیر این صورت، در طول زمان کارایی فیزیکی خود را از دست داده و قادر نخواهد بود که از بروز انواع فسادهای میکروبی و شیمیایی در ماده غذایی درون خود، جلوگیری به عمل آورد. حلالیت فیلم‌ها با افزودن مقادیر مختلف نانوذرات به جز نانوسلولز افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) نشان داد. کم‌ترین میزان درصد حلالیت مربوط به فیلم‌های حاوی ۱ و ۳ درصد نانوسلولز باکتریایی به‌میزان ۳۴/۶۸ درصد و ۳۲/۴۱ درصد و ۱ درصد نانوتیتانیوم دی‌اکسید به میزان ۴۲/۳۲ درصد بوده که این کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) نبوده است. در حالی که در سایر تیمارها با افزودن نانوذرات حلالیت فیلم‌ها افزایش یافت به طوری که بیش‌ترین مقدار حلالیت ۵۱/۸۱ درصد در فیلم حاوی ۳ درصد نانوکیتوزان بود. به‌طور کلی افزودن نانوذرات به بستر فیلم به جز در نانوکامپوزیت حاوی نانوسلولز باعث افزایش حلالیت فیلم‌ها گردید (جدول ۱). علت پدیده کاهش میزان حلالیت با افزایش نانوذرات سلولز به درون بستر پلیمری، می‌تواند ناشی از تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین پروتئین و نانوسلولز باشد. اساساً سلولز قابل حل در آب نمی‌باشد، به‌ویژه بخش‌های کریستالی آن که به هیچ وجه قابل نفوذ نسبت به مولکول‌های آب نیستند. افزایش این ماده در فیلم، موجب کاهش میزان ماتریس شده، به این ترتیب جایگزینی بیش‌تر آن در آب موجب کاهش میزان حلالیت خواهد شد. نتایج حاصل با مشاهدات حاصل از پژوهش ردی و همکاران پیرامون افزودن نانوسلولز به پلیمر آگار همخوانی دارد (۳۱).

میکرومسیرهای موجود در فیلم‌ها یا به‌دلیل افزایش خاصیت آب‌گریزی نانوذرات در اثر افزایش اندازه نانوذرات و یا هر دوی آن‌ها باشد. تأثیر نانوسلولز بر نفوذپذیری بخار آب در برخی مطالعات دیگر مشاهده شد و از نظر ساختار کریستالی متراکم ذرات نانوسلولز توضیح داده شد که به‌عنوان موانع نفوذناپذیر در مسیر انتقال مولکول‌های آب از طریق لایه‌ها عمل می‌کنند (۴۲). بنابراین، مولکول‌های آب در حال انتشار باید از طریق یک مسیر پریپیچ و خم به‌جای مسیر مستقیم در سراسر لایه‌ها حرکت کنند و سرعت نفوذ آن‌ها را کاهش دهند. یکی دیگر از دلایل احتمالی کاهش نفوذپذیری بخار آب، متراکم شدن سطح لایه‌ها و بسته شدن نسبی منافذ سطحی به‌دلیل وجود ذرات نانوسلولز است.

درصد رطوبت و حلالیت: حساسیت فیلم‌های مبتنی بر پلیمرهای زیستی به آب تأثیر قابل‌توجهی بر ماندگاری مواد غذایی بسته‌بندی شده دارد. مقاومت ضعیف در برابر آب یکی از عیوب اصلی اکثر فیلم‌های مبتنی بر پلیمرهای زیستی در بسته‌بندی مواد غذایی است (۴۳). با توجه به جدول ۱ افزودن نانوذرات مختلف موجب افزایش میزان رطوبت فیلم‌ها شده است. درصد رطوبت در فیلم فاقد نانوذره ۱۸/۱۲ درصد بوده است. کم‌ترین میزان افزایش درصد رطوبت مربوط به فیلم حاوی ۱ و ۳ درصد نانوسلولز به‌ترتیب ۲۱/۱۳، ۲۰/۹۳ و بیش‌ترین درصد رطوبت مربوط به فیلم حاوی ۳ درصد نانوذره تیتانیوم دی‌اکسید با ۲۴/۳۹ درصد بوده است. نانوکامپوزیت‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوذرات در مقایسه با فیلم فاقد ذرات نانو از نظر میزان درصد رطوبت افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) داشتند. که با نتایج حاصل از پژوهش دمانوس و همکاران افزودن مقادیر مختلف تیتانیوم دی‌اکسید به ژلاتین همخوانی داشت (۴۰).

رنگ سطحی، کدورت و نفوذپذیری نسبت به نور: رنگ و شفافیت بسته‌بندی مواد غذایی، نقش مهمی در ظاهر و مقبولیت آن‌ها توسط مصرف‌کننده دارد. برای بیان شفافیت فیلم‌ها از شاخص تیرگی (کدورت) استفاده می‌شود، به طوری که با افزایش کدورت از شفافیت فیلم کاسته می‌شود (۳۴). مقادیر L^* ، a^* و b^* هانتر و اختلاف رنگی کل (ΔE) فیلم‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. افزودن نانوذرات منجر به تغییر معنی‌دار ($P < 0/05$) L و b نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذره گردید. روشنایی فیلم‌ها با افزودن نانوذرات افزایش یافت. به طوری که با افزودن نانوذرات مقادیر a به شکل معنی‌دار ($P < 0/05$) تغییر یافت، بیش‌ترین مقدار a مربوط به فیلم حاوی ۳ درصد نانو تیتانیوم دی اکسید ۳/۵۱ و کم‌ترین میزان مربوط به ۱ درصد نانورس و ۲/۱۱ بوده است. مقادیر b با افزودن ذرات نانو کاهش معنی‌دار ($P < 0/05$) یافت. بیش‌ترین مقدار b مربوط به فیلم فاقد نانوذره و ۷/۵۵ و سپس به ترتیب در فیلم حاوی ۳ و ۱ درصد نانو ذرات تیتانیوم دی اکسید و ۳ درصد نانو سلولز بوده است.

میزان اختلاف رنگی کل فیلم‌ها به صورت معنی‌دار ($P < 0/05$) از ۱۱/۲۸ در فیلم فاقد نانوذره بوده که با افزودن نانوذرات به بستر فیلم پروتئینی میزان اختلاف رنگ به شکل معنی‌داری ($P < 0/05$) کاهش یافت. کم‌ترین میزان اختلاف ۴/۹۷ و مربوط به فیلم حاوی ۳ درصد نانوکیتوزان و سپس بیش‌ترین کاهش اختلاف رنگ در نانوذرات رس و

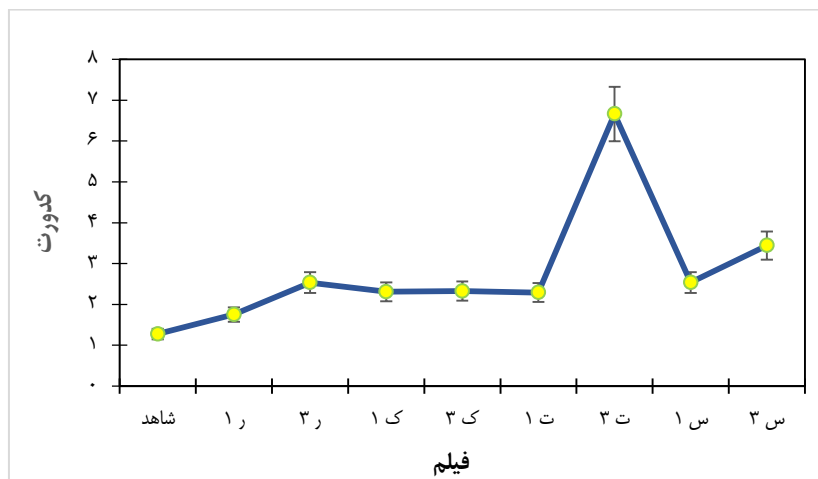
نانوذرات سلولز نیز مشاهده شد. کم‌ترین کاهش اختلاف رنگ مربوط به نانوذرات تیتانیوم دی اکسید بوده است. شاخص سفیدی نیز با افزودن نانوذرات افزایش معنی‌داری ($P < 0/05$) یافت. شاخص سفیدی در فیلم فاقد نانوذره ۸۴/۲۷ بوده که کم‌ترین میزان افزایش شاخص سفیدی مربوط به فیلم‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید بوده است. در سایر فیلم‌ها میزان سفیدی تقریباً به یک میزان افزایش یافت.

کدورت فیلم‌ها با افزودن نانوذرات به طور معنی‌دار ($P < 0/05$) افزایش یافت. میزان کدورت در فیلم فاقد نانوذره ۱/۲۸ بود. هم‌چنین میزان کدورت فیلم‌های حاوی ۳ درصد تیتانیوم دی اکسید ۶/۶۶ بوده که بیش‌ترین مقدار کدورت را در بین نانوذرات مختلف نشان داده است. مقادیر نفوذپذیری فیلم حاوی نانوذرات نسبت به نور در طول موج‌های بین ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر در شکل ۲ نشان داده شده است. افزودن نانوذرات موجب کاهش نفوذپذیری فیلم‌ها به نور در طول موج‌های مختلف، به خصوص در ناحیه فرابنفش و طول موج‌های کم‌تر از ۳۵۰ نانومتر گردید. کم‌ترین میزان انتقال نور مربوط به فیلم حاوی ۳ درصد نانوذرات تیتانیوم دی اکسید و سپس مربوط به فیلم حاوی ۱ درصد نانوذره تیتانیوم دی اکسید و ۳ درصد نانوسلولز بوده است. که نشان‌دهنده این هست که نانوذرات تیتانیوم دی اکسید به میزان زیادی از عبور نور جلوگیری می‌کنند که با نتایج حاصل از پژوهش وجدان و همکاران (۲۳) همخوانی دارد.

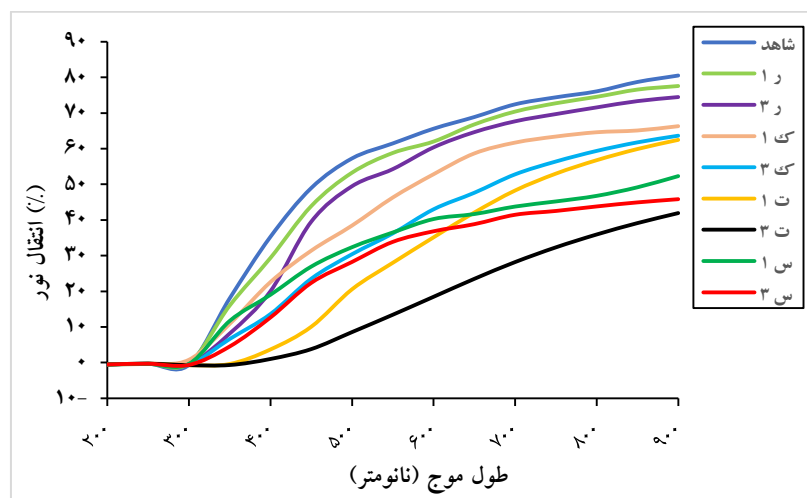
جدول ۲- ویژگی‌های رنگ سطحی فیلم پروتئینی حاوی مقادیر مختلف از نانوذرات.

WI	ΔE	b*	a*	L*	نوع فیلم
۸۴/۲۷ ^e	۱۱/۲۸ ^f	۷/۰±۵۵/۰۳۶ ^d	۲/۰±۷۵/۰۵ ^c	۸۶/۴۸ ^c	شاهد
۹۰/۲۸ ^b	۵/۴۱ ^b	۳/۶۲ ^c	۲/۱۱ ^a	۹۱/۲۳ ^a	رس ۱ درصد
۹۰/۰±۵۸/۰۷۱ ^a	۵/۰±۲۶/۰۶۴ ^b	۲/۰±۷۳/۰۱۵ ^a	۲/۰±۷۲/۰۳۱ ^c	۹۱/۰±۴۱/۰۶۵ ^a	رس ۳ درصد
۹۰/۰±۵۹/۰۱۹ ^a	۵/۰±۲۵/۰۴۶ ^b	۲/۰±۷۲/۰۶۶ ^a	۲/۰±۲۹/۰۶۱ ^c	۹۱/۰±۴۲/۰۳۶ ^a	کیتوزان ۱ درصد
۹۰/۰±۷۱/۰۷ ^a	۴/۹۷ ^a	۲/۰±۷۲/۰۶۱ ^a	۲/۲۹ ^b	۹۱/۰±۴۲/۰۲۷ ^a	کیتوزان ۳ درصد
۸۷/۰±۵۸/۰۳۶ ^d	۷/۰±۹۸/۰۳۹ ^e	۳/۰±۵۳/۰۶ ^{bc}	۲/۰±۷۴/۰۲۶ ^c	۸۸/۰±۶۲/۰۲۷ ^b	تیتانیوم دی اکسید ۱ درصد
۸۷/۰±۷۹/۰۳۵ ^c	۷/۰±۵۷/۰۲۷ ^d	۳/۰±۵۳/۰۳۵ ^{bc}	۳/۰±۵۱/۰۴ ^d	۸۸/۰±۶۴/۰۳۸ ^b	تیتانیوم در اکسید ۳ درصد
۹۰/۰±۶۰/۰۲۵ ^a	۵/۰±۲۴/۰۳۸ ^b	۲/۰±۷۱/۰۲۷ ^a	۲/۰±۷/۰۳۱ ^c	۹۱/۰±۴۲/۰۱۵ ^a	سلولز ۱ درصد
۹۰/۰±۱۹/۰۵۷ ^b	۵/۰±۷۰/۰۱۸ ^c	۳/۰±۵۱/۰۱۵ ^b	۲/۰±۷/۰۳۱ ^c	۹۱/۰±۲۴/۰۶ ^a	سلولز ۳ درصد

^{a, b, c} و حروف کوچک در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح $P < 0.05$



شکل ۱- میزان کدورت فیلم‌های حاوی مقادیر مختلف نانوذرات.



شکل ۲- درصد انتقال نور فیلم‌های حاوی مقادیر مختلف نانوذرات.

نتیجه‌گیری کلی

خواص مکانیکی و بیش‌ترین کاهش در میزان نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌ها و کم‌ترین میزان رطوبت و حلالیت در فیلم‌ها در مقایسه با سایر نانوذرات بوده است. هم‌چنین فیلم‌های حاوی ۳ درصد نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید بیش‌ترین میزان کدورت و کم‌ترین میزان انتقال نور را دارا بوده است. پس از نانو تیتانیوم دی‌اکسید فیلم حاوی نانوسلولز ۳ درصد بیش‌ترین کدورت را نشان داده است. با توجه به نتایج بالا فیلم حاوی ۳ درصد نانوسلولز از نظر خواص مکانیکی و فیزیکی بهترین ویژگی را نسبت به سایر فیلم‌های حاوی نانوذرات نشان داد و از نظر ویژگی‌های ظاهری نیز بهبود قابل‌توجهی نشان داد.

در پژوهش حاضر جهت بهبود ویژگی‌های فیلم پروتئین فانوس ماهی، اثر افزودن دو سطح (۱ و ۳ درصد) از هر کدام از نانوذرات (رس، کیتوزان، تیتانیوم دی‌اکسید و سلولز باکتریایی) بر خواص فیزیکی، مکانیکی، ظاهری نانوکامپوزیت‌ها به منظور انتخاب بهترین درصد و نوع نانوذره جهت تعیین فیلم زیست‌تخریب‌پذیر بهینه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، افزودن نانوذرات می‌تواند بر روی خصوصیات و ویژگی‌های فیلم اثر مثبت داشته و ویژگی‌های فیلم را بهبود بخشد. بیش‌ترین تأثیر افزودن نانوذرات به فیلم پروتئینی مربوط به فیلم حاوی ۳ درصد نانوذره سلولز باکتریایی بوده که سبب بهبود

منابع

1. Ferreira, A. R., Alves, V. D., & Coelho, I. M. (2016). Polysaccharide-based membranes in food packaging applications. *Membranes*, 6(2), 22.
2. Young, E., Miroso, M., & Bremer, P. (2020). A systematic review of consumer perceptions of smart packaging technologies for food. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 63.
3. Robertson, G. (2016). Chapter 7. Metal packaging materials. In (pp. 189-228): CRC Press.
4. Alves, V., Costa, N., Hilliou, L., Larotonda, F., Gonçalves, M., Sereno, A., & Coelho, I. (2006). Design of biodegradable composite films for food packaging. *Desalination*, 199(1-3), 331-333.
5. Salvatore, M., Marra, A., Duraccio, D., Shayanfar, S., Pillai, S. D., Cimmino, S., & Silvestre, C. (2016). Effect of electron beam irradiation on the properties of polylactic acid/montmorillonite nanocomposites for food packaging applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(2).
6. Khalil, H., Tye, Y., Saurabh, C., Leh, C., Lai, T., Chong, E., Fazita, M., Hafidz, J. M., Banerjee, A., & Syakir, M. (2017). Biodegradable polymer films from seaweed polysaccharides: A review on cellulose as a reinforcement material. *Express Polymer Letters*, 11(4).
7. Salgado, P. R., Ortiz, C. M., Musso, Y. S., Di Giorgio, L., & Mauri, A. N. (2015). Edible films and coatings containing bioactives. *Current Opinion in Food Science*, 5, 86-92.
8. Tomadoni, B., Capello, C., Valencia, G. A., & Gutiérrez, T. J. (2020). Self-assembled proteins for food applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 1-16.
9. Limpan, N., Prodpran, T., Benjakul, S., & Prasarpran, S. (2012). Influences of degree of hydrolysis and molecular weight of poly (vinyl alcohol)(PVA) on properties of fish myofibrillar protein/PVA blend films. *Food Hydrocolloids*, 29(1), 226-233.
10. Pires, C., Ramos, C., Teixeira, G., Batista, I., Mendes, R., Nunes, L., & Marques, A. (2011). Characterization of biodegradable films prepared with hake proteins and thyme oil. *Journal of Food Engineering*, 105(3), 422-428.
11. Othman, S. H., Nordin, N., Azman, N. A. A., Tawakkal, I. S. M. A., & Basha, R. K. (2021). Effects of nanocellulose

- fiber and thymol on mechanical, thermal, and barrier properties of corn starch films. *International journal of biological macromolecules*, 183, 1352-1361.
12. Kuswandi, B., & Moradi, M. (2019). Improvement of food packaging based on functional nanomaterial. *Nanotechnology: applications in energy, drug and food*, 309-344.
 13. Yang, H. C., Wang, W. H., Huang, K. S., & Hon, M. H. (2010). Preparation and application of nanochitosan to finishing treatment with anti-microbial and anti-shrinking properties. *Carbohydrate Polymers*, 79 (1), 176-179.
 14. Ukhtezari, S., Almasi, H., Pirsá, S., Zandi, M., & Pirouzifard, M. (2017). Development of bacterial cellulose based slow-release active films by incorporation of *Scrophularia striata* Boiss. extract. *Carbohydrate Polymers*, 156, 340-350.
 15. Jia, H., Jia, Y., Wang, J., Hu, Y., Zhang, Y., & Jia, S. (2009, October). Potentiality of bacterial cellulose as the scaffold of tissue engineering of cornea. In *2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics* (pp. 1-5). IEEE.
 16. Liyaskina, E., Revin, V., Paramonova, E., Nazarkina, M., Pestov, N., Revina, N., & Kolesnikova, S. (2017). Nanomaterials from bacterial cellulose for antimicrobial wound dressing. *Journal of Physics: Conference Series*.
 17. Nordin, N., Othman, S., Kadir Basha, R., & Abdul Rashid, S. (2018). Mechanical and thermal properties of starch films reinforced with microcellulose fibres.
 18. Slavutsky, A. M., Bertuzzi, M. A., Armada, M., García, M. G., & Ochoa, N. A. (2014). Preparation and characterization of montmorillonite/brea gum nanocomposites films. *Food Hydrocolloids*, 35, 270-278 .
 19. Fabra, M., Jiménez, A., Atarés, L., Talens, P., & Chiralt, A. (2009). Effect of fatty acids and beeswax addition on properties of sodium caseinate dispersions and films. *Biomacromolecules*, 10(6), 1500-1507.
 20. Alexandre, M., & Dubois, P. (2003). *Mater Sci. Eng. Rep.* 2000, 28, 1-63.(c) Ray, SS; Okamoto, M. *Prog. Polym. Sci.* 28, 1539-1641.
 21. Ali, I., Suhail, M., Alothman, Z. A., & Alwarthan, A. (2018). Recent advances in syntheses, properties and applications of TiO₂ nanostructures. *RSC advances*, 8 (53), 30125-30147.
 22. Zhang, X., Xiao, G., Wang, Y., Zhao, Y., Su, H., & Tan, T. (2017). Preparation of chitosan-TiO₂ composite film with efficient antimicrobial activities under visible light for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 169, 101-107.
 23. Vejdan, A., Ojagh, S. M., Adeli, A., & Abdollahi, M. (2016). Effect of TiO₂ nanoparticles on the physico-mechanical and ultraviolet light barrier properties of fish gelatin/agar bilayer film. *LWT-Food Science and Technology*, 71, 88-95.
 24. Li, Y., Jiang, Y., Liu, F., Ren, F., Zhao, G., & Leng, X. (2011). Fabrication and characterization of TiO₂/whey protein isolate nanocomposite film. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1098-1104.
 25. He, Q., Zhang, Y., Cai, X., & Wang, S. (2016). Fabrication of gelatin-TiO₂ nanocomposite film and its structural, antibacterial and physical properties. *International journal of biological macromolecules*, 84, 153-160.
 26. De Moura, M. R., Aouada, F. A., Avena-Bustillos, R. J., McHugh, T. H., Krochta, J. M., & Mattoso, L. H. (2009). Improved barrier and mechanical properties of novel hydroxypropyl methylcellulose edible films with chitosan/tripolyphosphate nanoparticles. *Journal of Food Engineering*, 92(4), 448-453.
 27. de Moura, M. R., Lorevice, M. V., Mattoso, L. H., & Zucolotto, V. (2011). Highly stable edible cellulose films incorporating chitosan nanoparticles. *Journal of food science*, 76(2), 25-29.
 28. Hosseini, S. F., Rezaei, M., Zandi, M., & Farahmandghavi, F. (2015). Fabrication of bio-nanocomposite films based on fish gelatin reinforced with chitosan nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 44, 172-182.

29. Pereda, M., Amica, G., Rácz, I., & Marcovich, N. E. (2011). Structure and properties of nanocomposite films based on sodium caseinate and nanocellulose fibers. *Journal of Food Engineering*, 103(1), 76-83.
30. Atef, M., Rezaei, M., & Behrooz, R. (2014). Preparation and characterization agar-based nanocomposite film reinforced by nanocrystalline cellulose. *International journal of biological macromolecules*, 70, 537-544.
31. Reddy, J. P., & Rhim, J. W. (2014). Characterization of bionanocomposite films prepared with agar and paper-mulberry pulp nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*, 110, 480-488.
32. Memiş, S., Tornuk, F., Bozkurt, F., & Durak, M. Z. (2017). Production and characterization of a new biodegradable fenugreek seed gum based active nanocomposite film reinforced with nanoclays. *International journal of biological macromolecules*, 103, 669-675.
33. Alexandre, E. M. C., Lourenço, R. V., Bittante, A. M. Q. B., Moraes, I. C. F., & do Amaral Sobral, P. J. (2016). Gelatin-based films reinforced with montmorillonite and activated with nanoemulsion of ginger essential oil for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 10, 87-96.
34. Farahnaky, A., Dadfar, S. M. M., & Shahbazi, M. (2014). Physical and mechanical properties of gelatin-clay nanocomposite. *Journal of Food Engineering*, 122, 78-83.
35. ASTM. (2002). Standard test methods for water vapor transmission of material, E 96-95. Annual book of ASTM, American Society for Testing and Material. Philadelphia, PA.
36. ASTM. (1995). Standard test method for water vapour transmission of materials (E 96-95). *Annual Book of American Standard Testing Methods*, 719-725.
37. Ojagh, S. M., Rezaei, M., Razavi, S. H., & Hosseini, S. M. H. (2010). Development and evaluation of a novel biodegradable film made from chitosan and cinnamon essential oil with low affinity toward water. *Food Chemistry*, 122(1), 161-166.
38. Tunc, S., Angellier, H., Cahyana, Y., Chalier, P., Gontard, N., & Gastaldi, E. (2007). Functional properties of wheat gluten/montmorillonite nanocomposite films processed by casting. *Journal of membrane science*, 289(1-2), 159-168.
39. (Ge et al., 2018).
40. de Matos Fonseca, J., Valencia, G. A., Soares, L. S., Dotto, M. E. R., Campos, C. E. M., Moreira, R. d. F. P. M., & Fritz, A. R. M. (2020). Hydroxypropyl methylcellulose-TiO₂ and gelatin-TiO₂ nanocomposite films: Physicochemical and structural properties. *International journal of biological macromolecules*, 151, 944-956.
41. Mir, S. A., Dar, B., Wani, A. A., & Shah, M. A. (2018). Effect of plant extracts on the techno-functional properties of biodegradable packaging films. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 141-154.
42. Poonguzhali, R., Basha, S. K., & Kumari, V. S. (2017). Synthesis and characterization of chitosan-PVP-nanocellulose composites for in-vitro wound dressing application. *International journal of biological macromolecules*, 105, 111-120.
43. Haghghi, H., Leugoue, S. K., Pfeifer, F., Siesler, H. W., Licciardello, F., Fava, P., & Pulvirenti, A. (2020). Development of antimicrobial films based on chitosan-polyvinyl alcohol blend enriched with ethyl lauroyl arginate (LAE) for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 100, 105419.