



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

تولید فیلم زیست تخریب پذیر بر پایه پروتئین کنجاله پسته و بررسی ویژگی های فیزیکوشیمیایی آن

فریما آقایی^۱، ناصر صداقت^{۲*}، نرجس جنتی ها^۳، علی شریف^۴

۱- کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

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

۳- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

کلمات کلیدی:

پروتئین،

خواص مکانیکی،

خواص بازدارندگی،

فیلم زیست تخریب پذیر،

کنجاله پسته

DOI: 10.4831/fsct.2026.118542.83046

* مسئول مکاتبات:

sedaghat@um.ac.ir

کنجاله پسته عمده ترین بخش محصولات جانبی کارخانجات روغن کشتی پسته (بیش از ۶۰ درصد) را تشکیل می دهد. در کنجاله پسته ترکیبات با ارزش تغذیه ای شامل پروتئین، مواد معدنی و ویتامین ها وجود دارد. همچنین، کنجاله پسته منبعی غنی از پروتئین است. هدف از انجام این پژوهش، تولید فیلم زیست تخریب پذیر از پروتئین کنجاله پسته و بررسی تأثیر تیمارهای غلظت گلیسرول در سه سطح (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷) گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته و pH در سه سطح (۱۰، ۱۱ و ۱۲) بر ویژگی های فیلم (خواص مکانیکی، نفوذ پذیری به اکسیژن و نفوذ پذیری به بخار آب و خواص میکروسکوپی) بود. نتایج خواص مکانیکی نشان داد با افزایش غلظت گلیسرول، مقاومت به کشش و ازدیاد طول افزایش پیدا کرد، در حالی که مدول الاستیک کاهش یافت ($P < 0/05$). افزایش pH باعث افزایش مقاومت به کشش، ازدیاد طول و مدول الاستیک شد ($P < 0/05$). بررسی خواص بازدارندگی نمونه های فیلم زیست تخریب پذیر نشان داد که افزایش غلظت گلیسرول و pH اثر معنی داری بر نفوذ پذیری نسبت به اکسیژن و بخار آب داشت ($P < 0/05$). با افزایش غلظت گلیسرول و pH نفوذ پذیری نسبت به اکسیژن و بخار آب کاهش یافت ($P < 0/05$) و در بررسی مورفولوژی ساختار فیلم های زیست تخریب پذیر مختلف، خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه ها کاملاً با میکروگراف های بدست آمده تطبیق داده شد. بنابراین فیلم بهینه بر پایه پروتئین کنجاله پسته در سطح غلظت ۰/۵ گلیسرول (گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته) و pH برابر ۱۱ انتخاب شد.

۱- مقدمه

پلیمرهای مصنوعی و مواد پلاستیکی جایگزین‌های مهمی برای شیشه، لاستیک و فلزات هستند و کاربردهای گسترده‌ای در اشکال مختلف دارند. تولید پلیمرهای مصنوعی می‌تواند بسیار ارزان و بادوام باشد. با این حال، خطرات مرتبط با فیلم‌های بسته‌بندی پلاستیکی مواد غذایی به طور فزاینده‌ای آشکار می‌شوند و تأثیرات منفی نگران‌کننده‌ای بر سلامت انسان و محیط زیست دارند. یکی از خطرات اصلی فیلم‌های بسته‌بندی پلاستیکی مواد غذایی، آزاد شدن مواد شیمیایی مضر مانند فتالات‌ها و بیسفنول به داخل مواد غذایی بسته‌بندی شده است. این مواد شیمیایی پلاستیک را انعطاف‌پذیرتر و بادوام‌تر می‌کنند، اما می‌توانند از ماتریس بسته‌بندی خارج شده و مواد غذایی داخل آن را آلوده کنند [۱، ۲]. مطالعات متعددی، قرار گرفتن در معرض این مواد شیمیایی را با چندین مشکل سلامتی، از جمله اختلالات رشدی، سرطان و اختلال غدد درون ریز مرتبط دانسته‌اند. پلاستیک‌ها، که اغلب مواد یکبار مصرف هستند، قابل بازیافت نیستند و در محل‌های دفن زباله قرار می‌گیرند که تجزیه آنها صدها سال طول می‌کشد. این آلودگی پلاستیکی با آسیب رساندن به حیات وحش، آلودگی آب‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای به جو، به طور جدی بر سلامت سیاره تأثیر می‌گذارد. بنابراین، به دلیل تأثیرات منفی مواد پلاستیکی بر محیط زیست، ضروری است که بیشتر بر پلیمرهای طبیعی تمرکز نمود [۳، ۴]. در این زمینه، بررسی جایگزین‌های پایدار می‌تواند به حفظ سلامت انسان کمک کند و محیط زیست بهتری را به نسل‌های آینده تحویل دهد. بنابراین، دانشمندان در تلاش هستند تا مواد پلیمری پیدا کنند که بتوانند به طور مناسب جایگزین فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی پلاستیکی مبتنی بر نفت شوند. در همین راستا، چندین ماکرومولکول بیوپلیمری با منشأ طبیعی مانند پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها به عنوان مواد ایده‌آل برای فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند [۵، ۶]. تمایل به استفاده از بسته‌بندی‌های زیست تخریب‌پذیر به دلیل دارا بودن مواد طبیعی و عدم ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی در صنعت، روز به روز در حال افزایش می‌باشد [۷].

بسته‌بندی‌های زیست تخریب پذیر حاصل از فرآورده‌های کشاورزی قابل برگشت به طبیعت هستند و توسط میکروارگانیسم‌ها در طی فرآیند کمپوست به محصولات طبیعی مانند دی اکسید کربن، آب، متان و توده زیستی تبدیل می‌شوند. بنابراین موجب آلودگی محیط زیست نمی‌گردند. بسته‌بندی خوراکی به عنوان لایه‌های نازکی از پوشش یا ماده‌ای تعریف می‌شود که در مواد غذایی گنجانده شده و می‌تواند بدون به خطر انداختن سلامت انسان مصرف شوند. این بسته‌ها می‌توانند به عنوان بسته‌بندی اولیه عمل کنند، فعالیت آبی یک ماده غذایی را کنترل کنند، انتقال جرم را در غذاهای فرآوری شده تنظیم کنند، سیستمی برای اجزای فعال زیستی ارائه دهند و به عنوان منابع جذابیت حسی عمل کنند [۸-۱۰]. رشد روزافزون کاربرد فیلم‌های زیست تخریب پذیر به واسطه جلوگیری از نفوذ دی اکسید کربن، رطوبت، اکسیژن و چربی‌ها و داشتن خواص مکانیکی مناسب، رقابتی بس عظیم را در مبحث پیشرفته بسته‌بندی مواد غذایی ایجاد نموده است [۱۱]. در میان بیوپلیمرهایی که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند، استفاده از پروتئین‌ها برای توسعه بسته‌های زیست تخریب‌پذیر شایسته تأکید است. با توجه به خواص ذاتی پروتئین‌ها، آن‌ها مواد بسیار خوبی برای تهیه بسته‌های زیست تخریب پذیر، جلوگیری از دست دادن رطوبت و طعم، کنترل تبادلات گازی و انتقال مواد فعال هستند. علاوه بر این، بسته‌های مبتنی بر پروتئین می‌توانند در طول تجزیه خود نیتروژن فراهم کنند و به عنوان کود عمل کنند که در مقایسه با بسته‌های غیر پروتئینی یک مزیت قابل توجه است [۷]. پروتئین‌های گیاهی به مجموعه‌ای از ترکیبات مغذی اطلاق می‌شود که منشأ آن‌ها کاملاً گیاهی است و از منابعی مانند حبوبات (عدس، نخود، لوبیا)، دانه‌ها (کنجد، چیا، کتان)، مغزها (بادام، گردو، فندق)، غلات کامل (جو دوسر، برنج، قهوه ای، کینوا) و جلبک‌ها (اسپیرولینا) به دست می‌آید. پروتئین‌های گیاهی برای رژیم‌های غذایی و گان مناسب هستند مزایای متعددی از جمله تنوع، پایداری اقتصادی و وجود مواد مؤثر را ارائه می‌دهند [۱۳].

۱۲]. بسته‌بندی‌های تولید شده با پروتئین‌های گیاهی در محصولات لبنی، می‌توانند اکسیداسیون را در پنیر کاهش دهند. در میوه‌ها و سبزیجات، می‌توانند نفوذ گازها و بخار آب را به تأخیر بیندازند و همچنین تنفس را کاهش دهند. و در گوشت و فرآورده‌های گوشتی، می‌توانند تغییرات فیزیکوشیمیایی را به تأخیر بیندازند و غلظت اکسیژن و دی‌اکسید کربن را در گوشت تازه به حد مطلوب تنظیم کنند. با توجه به منبع پروتئین‌ها، شایان ذکر است که جامعه علمی تلاش‌های قابل توجهی برای استفاده مجدد از محصولات جانبی صنعت فرآوری محصولات کشاورزی و غذایی انجام داده است. این امر از آن جهت اهمیت دارد که به کاهش ضایعات، تأثیر مثبت بر محیط زیست، سود رساندن به اقتصاد و بهره‌برداری از منابع کم استفاده کمک می‌کند. بنابراین، استفاده از محصولات جانبی برای ایجاد بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر و زیستی، روندی رو به رشد است [۱۴]. تحقیقات نشان داده است که سالانه حدود ۴۰۰,۰۰۰ تن محصولات فرعی پسته در کشور تولید می‌شود. در حال حاضر مصرف خاصی برای این فرآورده‌های فرعی وجود ندارد و حجم انبوه در فصل برداشت و رطوبت بالای این محصولات باعث آلودگی محیط زیست و باغ‌های پسته می‌شود. مغز پسته به طور متوسط دارای ۲۰ درصد پروتئین می‌باشد که در میان پروتئین‌های گیاهی، منبع کاملی از پروتئین -ها به شمار می‌رود. در نتیجه فیلم زیست تخریب پذیر تولید شده از آن، کیفیت تغذیه‌ای مناسبی را داراست. پسته شامل ۴ پروتئین ساده آلبومین (محلول در آب)، گلوبولین (محلول در آب نمک رقیق)، پرولامین (محلول در اتانول ۷۰ درصد) و گلوتلین (نسبتاً محلول در اسید رقیق یا قلیا) می‌باشد که به ترتیب میزان ۲۵، ۶۶، ۲ و ۷/۳ درصد کل پروتئین را به خود اختصاص می‌دهند که در این پژوهش، پروتئین گلوبولین به منظور تولید فیلم خوراکی استخراج شد [۱۵، ۸]. بسته‌های مبتنی بر پروتئین معمولاً در طول شکل‌گیری حرارتی، شکنندگی و تردی از خود نشان می‌دهند و این ویژگی‌ها منجر به خواص مکانیکی ضعیف در مورد فرآیندپذیری و کاربرد نهایی آن‌ها می‌شود. با این حال، هنگامی که نرم‌کننده‌های طبیعی و یا زیست‌تخریب‌پذیر که سازگاری خوبی با بیوپلیمر

مبتنی بر پروتئین دارند، اضافه می‌شوند، ویسکوالاستیسیته و قابلیت کشش بسته‌ها بهبود می‌یابد [۱۶]. نرم‌کننده‌ها دسته مهمی از ترکیبات غیرفرار با وزن مولکولی کم هستند که به طور گسترده در صنایع پلیمری به عنوان افزودنی استفاده می‌شوند. نقش اصلی چنین موادی بهبود انعطاف‌پذیری و فرآیندپذیری پلیمرها با کاهش دمای گذار مرتبه دوم، دمای گذار شیشه‌ای است. نرم‌کننده‌ها می‌توانند بین زنجیره‌های مولکولی پلیمری وارد شوند و از طریق واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی با پلیمرها ترکیب شوند و قابلیت کشش، انعطاف‌پذیری، الاستیسیته و قابلیت انبساط را افزایش داده و انسجام و سفتی را کاهش دهند. این مواد تنش تغییر شکل، سختی، چگالی، ویسکوزیته و بار الکترواستاتیک یک پلیمر را کاهش می‌دهند، همزمان انعطاف‌پذیری زنجیره پلیمر، مقاومت در برابر شکست و ثابت دی‌الکتریک را افزایش می‌دهند. همچنین خواص دیگر مانند درجه بلورینگی، شفافیت نوری، رسانایی الکتریکی و مقاومت در برابر تخریب زیستی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. گلیسرول تقریباً به طور سیستماتیک در اکثر فیلم‌ها گنجانده شده است در واقع یک مولکول بسیار جاذب رطوبت است که معمولاً برای جلوگیری از شکنندگی فیلم به محلول‌های تشکیل‌دهنده فیلم اضافه می‌شود [۱۷]. بنابراین هدف از این پژوهش، تولید فیلم زیست تخریب پذیر از پروتئین پسته و بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن و همچنین استفاده بهینه از کنجاله پسته کارخانجات روغن‌کشی بوده است. تاکنون تحقیقات زیادی در ارتباط با فرآیند تولید و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فیلم‌های پروتئینی انجام گرفته است اما هیچ گزارش علمی مبنی بر انجام تحقیق درباره ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فیلم پروتئین کنجاله پسته انتشار نیافته است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مواد

کنجاله پسته (حاوی ۴ درصد روغن)، پروتئین پسته (با درجه خلوص ۸۰ درصد)، از شرکت مانیلا واقع در رفسنجان، نمک آزید سدیم، از شرکت واکرمن واقع در مشهد، بازدارنده پروتئاز فنیل متیل سولفونیل فلوراید، از شرکت سیگمای آمریکا، اسید تری‌کلرواستیک، سود و گلیسرول از شرکت مرک آلمان

صفحه کاملاً صاف تهیه شده از جنس آلومینیوم به ابعاد (۶ سانتی متر × ۲۰ سانتی متر) به صورت یکنواخت پخش شده تا به مدت ۲۴ ساعت در مجاورت هوا و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد خشک شود. پس از ۲۴ ساعت فیلم از روی صفحه به آرامی برداشته شد (شکل ۱). سپس فیلم‌های تهیه شده برای انجام آزمون‌های مورد نظر به مدت یک هفته در کیسه‌های پلاستیکی پلی‌اتیلن در محیط آزمایشگاه نگهداری گردیدند. [۸]

در مطالعه جاری هدف، بررسی اثر گلیسرول به عنوان پلاستی سایزر (نرم کننده) و pH در کیفیت تهیه فیلم از کنجاله پسته بوده است. بنابراین نمونه شاهد (کنترل) وجود ندارد. سطوح مورد نظر گلیسرول و pH در تیمارها اعمال و صفت‌ها (خواص میکروسکوپی، میکروسکوپی، نفوذ پذیری به بخار آب و نفوذ پذیری به اکسیژن) بررسی شد و نهایتاً تیمار بهینه انتخاب شد.

خریداری گردیدند. پروتئین پسته در آزمایشگاه تحقیقاتی بسته‌بندی گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد استخراج و تهیه گردید.

۲-۲- تهیه فیلم

کنجاله‌های پسته خریداری شده، از روغن‌گیری پسته رقم اوحدی کرمان و تحت پرس دستگاهی تولید شده بودند. ابتدا ۹ گرم پروتئین کنجاله پسته را وزن کرده و سپس ۱۰۰ سی سی آب مقطر و گلیسرول در سه سطح غلظت (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷) گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته به محلول اضافه شد و pH آن نیز با سود ۰/۱ نرمال در سه سطح (۱۰، ۱۱ و ۱۲) تنظیم گردید. در مرحله بعد مخلوط حاصل در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد. سپس به منظور حباب‌گیری، مخلوط فوق برای ۵ دقیقه توسط سانتریفوژ (مدل Heraeus-200 ساخت آلمان) در ۵۰۰۰ g سانتریفوژ شد. در این مرحله ۲۴ سی سی از محلول شفاف بدست آمده روی یک



Fig. 1. Image from the pistachio meal protein film

از دستگاه میکروسکوپ الکترونی اسکنی روبشی (مدل-vaco ۵، ساخت آلمان) برای مطالعه ریزساختار فیلم‌های پلاستی سایز شده استفاده شد.

۲-۴- خواص مکانیکی

۲-۳- ارزیابی خواص میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM)

^۱ Scanning electron microscope

متراکم مشاهده شد (شکل (b) ۲). میکروگراف این فیلم نشان داد که چون مقدار کافی پلاستی‌سایزر برای افزایش پیوستگی بین زنجیرهای پلیمر وجود دارد، ماتریکس یکنواخت و مداوم در فیلم تشکیل می‌شود. این نوع ریزساختار می‌تواند دلیل - دیگری بر دارا بودن خواص مکانیکی و فیزیکی بهتر نسبت به دیگر نمونه فیلم‌ها باشد [۲۰]. در نمونه فیلم با غلظت ۰/۷ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته گلیسرول (شکل (c) ۲)، علی‌رغم ساختار فشرده و متراکم، فضاهای خالی نیز در فیلم دیده شد و دلیل آن به میزان بالای پلاستی‌سایزر برمی‌گردد که برای افزایش پیوستگی بین زنجیرهای پلیمر وجود دارد و سبب کشیدگی بیشتر فیلم و در نتیجه افت در خواص مکانیکی فیلم می‌شود. در مطالعه صارم نژاد و همکاران [۲۱] فیلم‌های انعطاف پذیر از ایزوله پروتئین باقلا در سطوح مختلف pH (۷، ۹ و ۱۲) و سطوح مختلف گلیسرول (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد) تهیه شدند. نتایج بهینه (خواص مکانیکی و نفوذپذیری نسبت به بخار آب) در غلظت ۴۰ درصد گلیسرول و pH برابر ۱۲ برای مطالعه ریز ساختار فیلم انتخاب شدند. سطحی بدون ترک همراه با کیسه های کوچکی از گلیسرول در شبکه پروتئینی مشاهده شد که می‌توانند مسئول انتقال رطوبت در فیلم باشند. میکروگراف مقطع عرضی فیلم نیز ریز ساختار خشنی را نشان داد که مشخصه فیلم پروتئینی بود. در مطالعه ای دیگر تفاوت در ریزساختار سطحی بین پلاستی‌سایزر سوربیتول و ساکاروز دیده شد. نتایج نشان داد هنگامی که از غلظت ۴ درصد سوربیتول و ۴ درصد گلیسرول در فیلم‌های پروتئینی حاصل از ماهی تیلاپای استفاده شد فیلم‌ها دارای سطح صاف و متراکم بدون ترک بودند [۲۲]. در مطالعه صادقی و همکاران [۲۳] در بررسی خواص میکروسکوپی، فیلم پروتئینی کنجاله کنجد حاوی سه سطح گلیسرول (۴۰، ۴۵ و ۵۰ درصد) ساخته شد. غلظت ۴۰ درصد گلیسرول دارای سطحی صاف با اندکی شکاف بود که نشان دهنده یکنواخت بودن ساختار فیلم پروتئینی بود.

برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی بر اساس استاندارد ASTM 1997 (ASTM 882)، از دستگاه universal testing machine (مدل M/10 شرکت MTS، ساخت سوئیس) استفاده شد.

۵-۲- نفوذپذیری به بخار آب^۱ (WVP)

اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبت به بخار آب بر اساس استاندارد ASTM 1995 (ASTM 96) و توسط دستگاه WVP Tester (مدل L80-5000، ساخت سوئیس) انجام شد [۱۸].

۶-۲- نفوذپذیری به اکسیژن^۲ (OP)

نفوذپذیری به اکسیژن به روش فشار یکسان ASTM F 1249 (ASTM 1995 e) به کمک دستگاه (Mocon, Inc, Minneapolis) OX-Tran (مدل 8030، ساخت آمریکا) اندازه‌گیری شد.

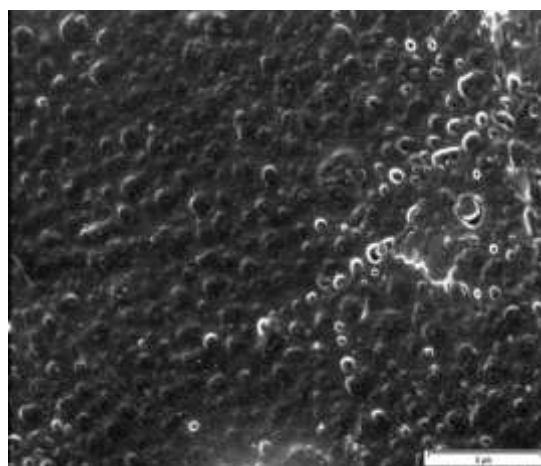
۷-۲- آنالیز آماری

داده‌ها با استفاده از طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل مورد آزمون آماری قرار گرفتند. هر یک از نمونه‌های فیلم در سه تکرار تولید شدند. به منظور تجزیه واریانس نتایج، نرم‌افزار Minitab مورد استفاده قرار گرفت. میانگین تکرارها توسط نرم افزار MSTATc در قالب آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح آماری ۵ درصد ($P < 0/05$) مورد مقایسه قرار گرفتند.

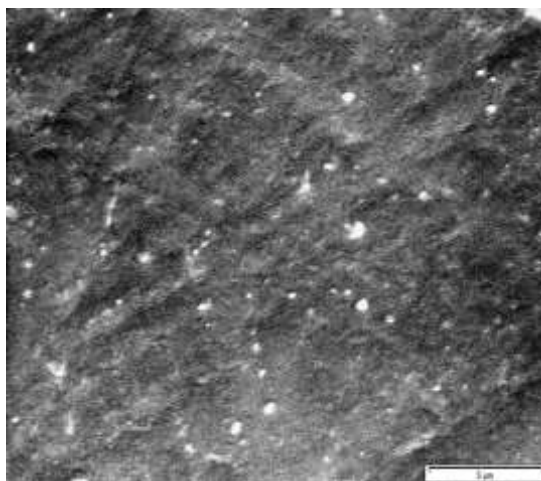
۳- نتایج و بحث

۱-۳- خواص میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

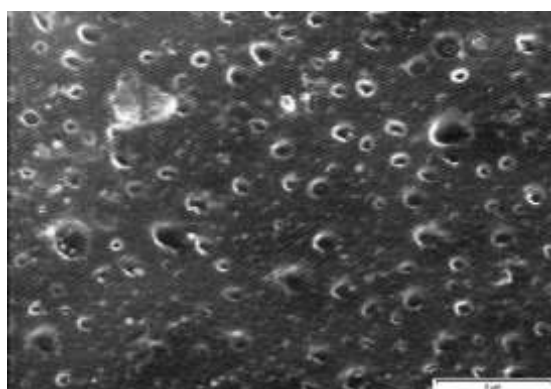
برای مشاهده و ارزیابی ریز ساختار فیلم‌های پروتئینی از آزمون SEM استفاده شد. در نمونه فیلم با غلظت ۰/۳ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته گلیسرول، ساختاری ضعیف با تعداد زیادی فضاهای خالی مشاهده شد (شکل (a) ۲). میکروگراف آن نشان داد که ماتریکس یکنواخت و مداوم در فیلم تشکیل نمی‌شود چون مقدار کمی پلاستی‌سایزر برای افزایش پیوستگی بین زنجیرهای پلیمر وجود دارد. این نوع ریزساختار خود می‌تواند دلیل دیگری بر بالا بودن نفوذپذیری این نمونه فیلم نسبت به بخار آب باشد [۱۹]. در نمونه فیلم با غلظت ۰/۵ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته گلیسرول، ساختاری فشرده و



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Electron microscope images of (a) pistachio meal protein film with 0.3% glycerol, (b) film with 0.5% glycerol, and (c) film with 0.7% glycerol

۳-۲- خواص مکانیکی

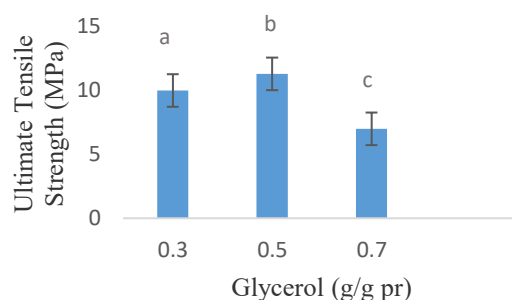
خواص مکانیکی فیلم ها نشان دهنده دوام و توانایی آن برای افزایش حفظ و نگهداری مواد غذایی است. خواص مکانیکی فیلم های پروتئینی تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله نوع پروتئین، غلظت پروتئین در حلال، نوع و غلظت نرم کننده قرار می گیرد. معمولاً فیلمی از نظر مکانیکی مطلوب است که در عین حال که استحکام مکانیکی آن بالا باشد کشش پذیری و انعطاف پذیری آن نیز بالا باشد و شکننده نباشد ولی در مواردی که فیلم خوراکی به عنوان بسته بندی ثانویه در مواد غذایی کاربرد دارد ویژگی های نسبتاً متوسط تا ضعیف نیز پاسخگو خواهد بود [۲۴، ۲۵].

شکل ۳(a, b, c) اثر غلظت گلیسرول، pH و اثر متقابل غلظت گلیسرول و pH را بر مقاومت به کشش فیلم نشان می دهد. تجزیه و تحلیل های آماری نشان دادند که افزایش غلظت گلیسرول و pH اثر معنی داری بر مقاومت به کشش فیلم داشت ($P < 0.05$). با افزایش غلظت گلیسرول، مقاومت به کشش فیلم به طور معنی داری افزایش یافت (شکل ۳(a))، اما زمانی که غلظت گلیسرول از ۰/۵ به ۰/۷ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته افزایش پیدا کرد، مقاومت به کشش فیلم نیز کاهش یافت که علت آن را می توان چنین بیان کرد که افزایش غلظت گلیسرول موجب لغزش زنجیره ها بر روی هم و کاهش به هم پیوستگی مولکولی می شود و در نتیجه مقاومت به کشش کاهش می یابد. با افزایش pH، مقاومت به کشش به طور معنی داری افزایش پیدا کرد (شکل ۳(b))، اما زمانی که pH نمونه با غلظت گلیسرول ۰/۵ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته از ۱۱ به ۱۲ افزایش پیدا کرد، کاهش محسوسی مشاهده شد که علت آن را به بالا بودن اسیدهای آمینه یونیزه در پروتئین پسته و حساس بودن نسبت به شرایط pH می توان نسبت داد. از آن جا که تشکیل فیلم مناسب در گسترده وسیعی از pH انجام نمی گیرد، در نتیجه افزایش بیش از حد pH باعث افزایش دیونیزه شدن زنجیرهای جانبی پروتئین، کاهش پیوستگی ساختاری و کاهش مقاومت به کشش فیلم می گردد [۲۶، ۲۷]. شکل ۳(c) اثر متقابل غلظت گلیسرول و pH را بر مقاومت به کشش فیلم نشان می دهد. نتایج نشان داد که مقاومت به کشش نمونه ها در

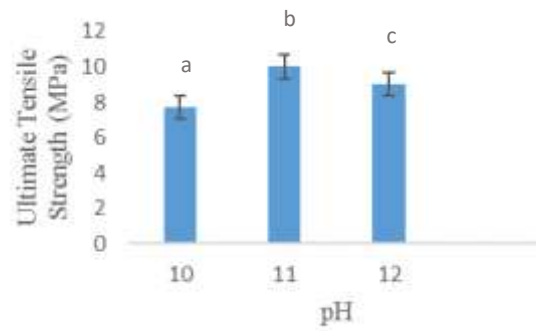
محدوده ۵ و ۱۳ مگا پاسکال قرار دارد. همچنین آنالیزهای آماری نشان دادند، افزایش غلظت گلیسرول و pH اثر معنی داری بر ازدیاد طول داشت ($P < 0.05$) با افزایش غلظت گلیسرول، مقاومت به کشش به طور معنی داری افزایش یافت (شکل ۴(d))، اما زمانی که غلظت گلیسرول از ۰/۵ تا ۰/۷ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته افزایش یافت، ازدیاد طول به طور معنی داری افزایش یافت که علت آن را می توان چنین بیان کرد که افزایش غلظت گلیسرول باعث ضعیف شدن بیش از حد ساختار شده و در نتیجه فیلم کشش پذیری بیشتری را نشان می دهد [۲۸]. با افزایش pH ازدیاد طول به طور معنی داری افزایش یافت (شکل ۴(e))، اما زمانی که pH از ۱۱ به ۱۲ افزایش پیدا کرد، کاهش محسوسی مشاهده شد. علت آن را می توان چنین بیان کرد که افزایش بیش از حد pH باعث افزایش دیونیزه شدن زنجیرهای جانبی پروتئین و در نتیجه کاهش پیوستگی ساختاری و نهایتاً کاهش ازدیاد طول می گردد. همچنین اثر متقابل غلظت گلیسرول و pH (شکل ۴(f))، نشان دادند که ازدیاد طول نمونه ها در محدوده ۱۹/۱۳ و ۴۴/۵۰ درصد قرار دارند [۲۹، ۳۰]. تجزیه و تحلیل های آماری نشان دادند اگرچه افزایش غلظت گلیسرول و pH اثر معنی داری بر مدول الاستیک داشت (شکل ۵(g, h)) ($P < 0.05$)، اما اثر متقابل غلظت گلیسرول و pH اثر معنی داری بر آن نداشت (شکل ۵(i)) با افزایش غلظت گلیسرول، مدول یانگ (الاستیک) به طور معنی داری کاهش یافت (شکل ۵(g)). علت آن را می توان چنین بیان کرد که با افزایش غلظت گلیسرول، فیلم ها کشش پذیری بالایی پیدا می کنند [۲۹، ۳۰، ۳۱]. با افزایش pH مدول یانگ به طور معنی داری افزایش یافت ($P < 0.05$). اما زمانی که pH از ۱۱ به ۱۲ افزایش پیدا کرد (شکل ۵(h))، اختلاف معنی داری مشاهده نشد ($P > 0.05$). نتایج این تحقیق نشان داد که مدول یانگ نمونه ها در اثر متقابل غلظت گلیسرول و pH (شکل ۵(i))، در محدوده ۸۱۰/۹ و ۱۰۰۰/۴ مگا پاسکال قرار داشت. با توجه به اینکه افزایش محتوای گلیسرین، رطوبت نهایی فیلم ها را افزایش می دهد، گلیسرول به عنوان نرم کننده، برهمکنش های پروتئین - پروتئین را کاهش داده و

گنادیوس و همکاران گزارش دادند که استحکام کششی ایزوله پروتئین سویا تحت تاثیر pH (۶ تا ۹) قرار نگرفت. آن ها بیان کردند که با افزایش pH ازدیاد طول فیلم ایزوله پروتئین سویا به مقدار کمی افزایش یافت [۳۳]. تاثیر غلظت گلیسرول (۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ گرم بر گرم) بر فیلم های ایزوله پروتئین سویا مورد بررسی قرار گرفت [۳۴]. با افزایش محتوای گلیسرول مقاومت کششی فیلم کاهش یافت و کمترین مقاومت کششی در فیلم های دارای ۰/۸ گرم بر گرم گلیسرول مشاهده شد. گلیسرول به عنوان نرم کننده منجر به انعطاف پذیری بیشتر فیلم، کاهش مقاومت کششی و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی آن ها شد. به طور کلی فیلم بدون نرم کننده حالت شیشه ای و ترد پیدا می کند و نرم کننده ها فیلم را از حالت شیشه ای به حالت انعطاف پذیر نزدیک می کنند.

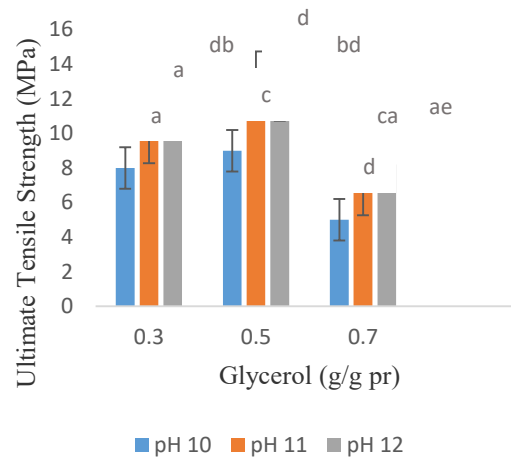
تحرك زنجیره های پلی پپتیدی را افزایش می دهد و به فیلم ها مقاومت کمتر و خاصیت ارتجاعی بیشتری می دهد [۳۲]. در مطالعه ای بالاترین استحکام کششی (۴مگا پاسکال) در pH برابر ۱۲ و محتوای ۴۰ درصد گلیسرول در فیلم های پروتئینی باقلا بدست آمد. همچنین بالاترین ازدیاد طول در نقطه شکست (۸/۳۷ درصد) در pH برابر ۱۲ و محتوای ۶۰ درصد گلیسرول مشاهده شد. افزایش غلظت گلیسرول (۶۰ درصد) استحکام کششی را کاهش داد در حالی که منجر به افزایش طول در نقطه شکست شد. گلیسرول، به عنوان نرم کننده از طریق کاهش پیوند هیدروژنی بین زنجیر های پروتئینی و افزایش فاصله انعطاف پذیری فیلم را افزایش داد. همچنین فرآیند حرارتی پروتئین ها منجر به افزایش پیوندهای عرضی زنجیره های پروتئینی شد در نتیجه شبکه پروتئینی محکم تر و فشرده تر تشکیل شد و نهایتا مقاومت مکانیکی افزایش یافت [۲۱].



(a)

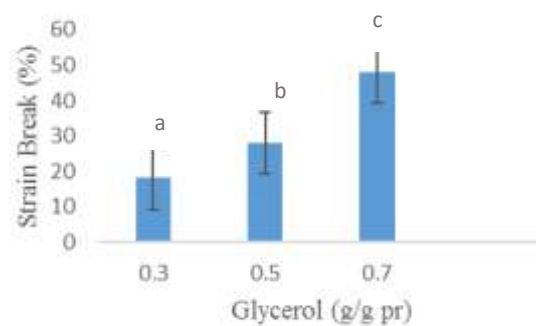


(b)

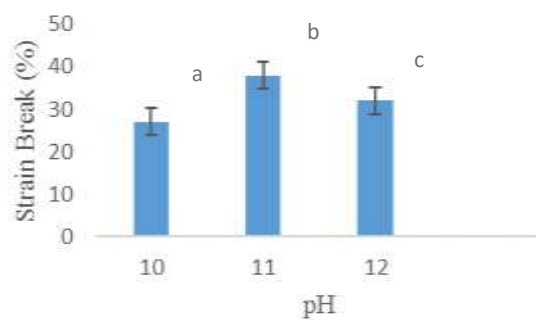


(c)

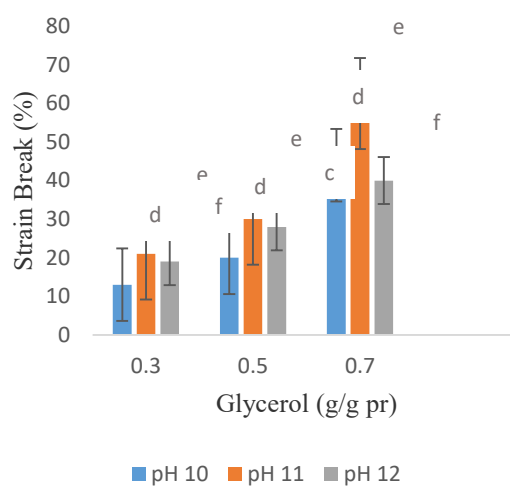
Fig. 3. Shows the effect of glycerol concentration (a), pH (b) and the interaction effect of glycerol concentration, pH (c) on the tensile strength properties of pistachio meal protein film



(d)

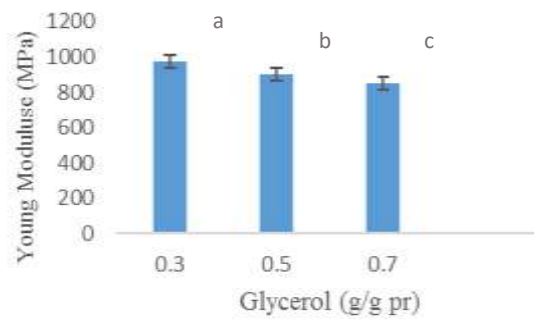


(e)

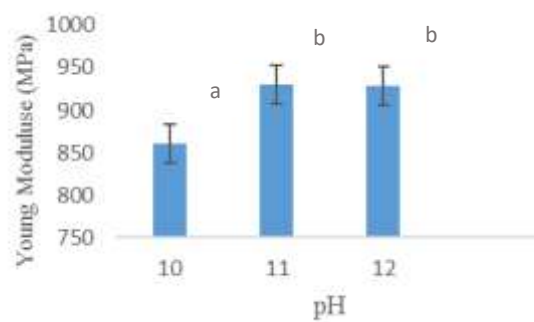


(f)

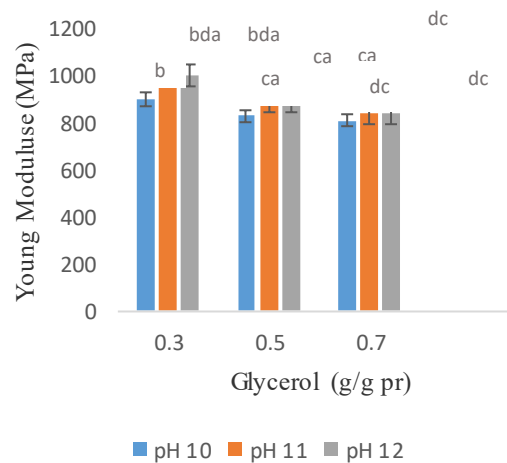
Fig. 4. Shows (d) the effect of glycerol concentration, (e) pH, and (f) the interaction between glycerol concentration and pH on the percentage elongation of pistachio meal protein film



(g)



(h)



(i)

Fig. 5. Shows (g) the effect of glycerol concentration, (h) pH, and (i) the interaction between glycerol concentration and pH on the Young's modulus of pistachio meal protein film

قابلیت بازدارندگی فیلم در برابر بخار آب عبارت است از

کاهش تبادل رطوبت محصول بسته بندی شده با اتمسفر

۳-۳- نفوذ پذیری به بخار آب

خارجی. تحرک زنجیره ی پلیمری و برهمکنش بین گروه های عملکردی پلیمرها بر نفوذ پذیری به بخار آب اثر می گذارد. فیلم های خوراکی پروتئینی به علت بالا بودن گروه های هیدروفیل در زنجیره های پلیمری بازدارندگی کمی در برابر بخار آب دارند. در ساختار پروتئین ها هر چه اسیدهای آمینه غیر قطبی نسبت به اسیدهای آمینه قطبی بالاتر باشد بازدارندگی نسبت به بخار آب بیشتر خواهد بود [۲۵]. تمامی نمونه ها نفوذپذیری نسبتاً بالایی نسبت به بخار آب داشتند. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، با افزایش غلظت گلیسرول از ۰/۳ تا ۰/۵ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته، نفوذپذیری نسبت به بخار آب در تمامی نمونه ها به طور معنی داری کاهش یافت. علت آن را می توان چنین بیان نمود که با افزایش غلظت گلیسرول پیوستگی مناسب بین زنجیرهای پروتئینی ایجاد می شود و با حذف فضاهای خالی و منافذ ریز در فیلم، اجازه خروج به مولکول های بخار آب داده نمی شود. اما زمانی که غلظت گلیسرول از ۰/۵ به ۰/۷ گرم بر گرم پروتئین پسته افزایش یافت، نفوذپذیری نسبت به بخار آب بطور قابل ملاحظه افزایش پیدا کرد. این ویژگی احتمالاً به افزایش تحرک زنجیرها و افزایش فضاهای خالی بین زنجیرهای پلیمر مربوط است [۳۵]. با افزایش pH، نفوذپذیری نسبت به بخار آب به طور معنی داری افزایش یافت ($P < 0.05$). اما زمانی که pH از ۱۱ به ۱۲ رسید، اختلاف معنی داری وجود نداشت ($P > 0.05$) و نفوذ پذیری نسبت به بخار آب تغییر اندکی کرد و کاهش یافت. علت آن را می توان چنین بیان کرد که در این محدوده pH بیشتر بر روی ساختار مولکولی و پیوندی اثر دارد ولی منجر به افزایش فضاهای خالی نمی شود و حتی در pH برابر ۱۲ نفوذپذیری مقداری کم شد [۳۶]. نتایج این تحقیق نشان داد که نفوذپذیری نسبت به بخار آب نمونه ها در محدوده ۸۷/۵۲ و ۱۵۳/۵۶ قرار داشت. اورلیاک و همکاران اثرات نرم کننده های مختلف بر خواص نفوذ پذیری نسبت به بخار آب در فیلم های حاوی پروتئین های آفتابگردان بررسی نمودند. در همه موارد، نفوذپذیری فیلم ها نسبت به بخار آب با افزایش مقدار نرم کننده (گلیسرول، اتیلن گلیکول، دی اتیلن

گلیکول، تری اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول) افزایش یافت. این به دلیل افزایش حجم آزاد بین زنجیره ها بود که باعث شل شدن شبکه پروتئین شد. از آنجایی که همه نرم کننده های مورد استفاده آب دوست بودند، افزایش غلظت آن ها باعث جذب بیشتر آب توسط شبکه و در نتیجه سطح بالاتری از انتقال بخار شد. پروپیلن گلیکول منجر به مقادیر پایین تری از نفوذ پذیری نسبت به بخار آب شد که ممکن است به دلیل چگالی بالاتر شبکه پروتئین باشد. به نظر می رسد این موضوع با ضخامت این فیلم ها که نازک تر از فیلم های به دست آمده با سایر نرم کننده ها بودند، مرتبط باشد [۳۷]. در مطالعه ای کاهش مقدار نفوذ پذیری به بخار آب در فیلم های پروتئینی باقلا در محتوای ۴۰ درصد گلیسرول و pH برابر ۱۲ مشاهده شد. کاهش نفوذ پذیری به بخار آب در نتیجه استفاده از عملیات حرارتی به دلیل ایجاد اتصالات عرضی بیشتر و تشکیل شبکه و ساختار پروتئینی فشرده تر بود [۲۱]. در فیلم های پروتئینی گلوبولین پسته، با افزودن اسید استئاریک (۲، ۴ و ۶ درصد وزنی) (به عنوان نرم کننده) نفوذ پذیری به بخار آب ۳۸/۵ الی ۴۲ درصد کاهش یافت. این امر ممکن است به دلیل افزایش سهم ترکیبات آبگریز در فیلم باشد [۲۵]. در فیلم های پروتئینی بنه (حاوی گلیسرول یک درصد) مقدار نفوذ پذیری به بخار آب به ۲۵/۹۹ mmg/m²dkpa رسید [۲۴]. در مطالعه دهقان شعار و همکاران نقش گلیسرول (۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ گرم بر گرم) بر فیلم پروتئینی ایزوله سویا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش محتوای گلیسرول، نفوذپذیری به بخار آب به طور معنی داری ($P < 0.05$) افزایش یافت. نرم کننده گلیسرول بر خاصیت آبدوستی فیلم اثر گذاشت که به علت تمایل زیاد گلیسرول به جذب رطوبت بود. با افزودن گلیسرول گروه های هیدروکسیل آبدوست در سطح فعال فیلم افزایش یافت که در نتیجه آن نقاط فعال برای جذب رطوبت نیز افزایش یافت. می توان نتیجه گرفت که آبدوستی و غلظت گلیسرول مهمترین تاثیر را بر تمایل فیلم به جذب بخار آب دارد [۳۴].

Table 1 shows the effect of pH and glycerol concentration on the water vapor permeability of pistachio meal protein films

Film type	Plasticizer amount (g/gper)	Water vapour permeability (g.mm/kpa.h.m ²)
Sample (pH=10)	0.3	145.896±0.0036 ^a
Sample (pH=10)	0.5	131.95±0.0052 ^b
Sample (pH=10)	0.7	172.65±0.0030 ^c
Sample (pH=11)	0.3	101.98±0.0051 ^d
Sample (pH=11)	0.5	87.86±0.0032 ^d
Sample (pH=11)	0.7	152.78 ±0.0028 ^e
Sample (pH=12)	0.3	100.43±0.0060 ^f
Sample (pH=12)	0.5	87.52±0.0051 ^g
Sample (pH=12)	0.7	153.52±0.0035 ^g

Lowercase letters in the column indicate significant differences at the 5% statistical level ($P < 0.05$)

قرار داشت. فیلم‌های پروتئین بادام‌زمینی با استفاده از چهار نوع نرم‌کننده (گلیسرین، سوربیتول، پلی‌اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول) در سه سطح (۰.۶۷، ۱.۱۷، ۱.۶۷ گرم بر گرم پروتئین) در مطالعه ای بررسی شد. گلیسرین بهترین عملکرد را به عنوان نرم‌کننده در مقایسه با سایرین نشان داد. غلظت گلیسرین بین ۰/۶۷ و ۱/۶۷ گرم بر گرم پروتئین، نفوذپذیری نسبت به اکسیژن را تحت تأثیر قرار نداد [۳۹]. در مطالعه زاهدی و همکاران تأثیر اسید پالمیتیک (۲، ۴ و ۶ درصد وزنی) (به عنوان نرم‌کننده) بر فیلم‌های پروتئینی گلوبولین پسته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن اسید پالمیتیک سبب کاهش نفوذپذیری نسبت به اکسیژن (از غلظت ۲ تا ۴ درصد اسید پالمیتیک) شد. با افزودن اسید چرب و انجام عمل هوموژنیزاسیون، این اسید فضاهای باز موجود در شبکه پلیمری فیلم را پر کرده و در نتیجه سرعت انتشار اکسیژن کاهش می‌یابد [۳۸]. نفوذپذیری نسبت به اکسیژن فیلم‌های تهیه شده از پروتئین گلوبولین کنجاله پسته در نتیجه افزودن اسید استئاریک (به عنوان نرم‌کننده) کاهش یافت. قطبیت زیاد پروتئین‌ها باعث افزایش انرژی پیوند و کاهش حجم آزاد شد در نتیجه سرعت نفوذ گازها کاهش یافت. هر چه تعداد گروه‌های قطبی و نسبت برهمکنش‌های قطبی-یونی بیشتر باشد فیلم بازدارندگی بیشتری در برابر اکسیژن از خود نشان می‌دهد زیرا اکسیژن یک مولکول غیر قطبی است [۲۵]. نرم‌کننده‌ها باعث ایجاد اختلال در زنجیره مولکولی و کاهش دمای انتقال شیشه‌ای می‌شوند. برای فرآیند نرم کردن ضروری

۳-۴- نفوذپذیری به اکسیژن

بخش عمده‌ای از اسیدهای آمینه پروتئین‌ها را اسیدهای آمینه قطبی (یونیزه و غیر یونیزه) تشکیل می‌دهند به همین دلیل پروتئین‌ها بازدارندگی خوبی در برابر اکسیژن و دی‌اکسید کربن دارند [۳۸]. تمامی نمونه‌ها نفوذپذیری نسبتاً پائینی نسبت به اکسیژن داشتند (جدول ۲). با افزایش غلظت گلیسرول تا ۰/۵ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته، نفوذپذیری نسبت به اکسیژن در تمامی نمونه‌های فیلم به طور معنی‌داری کاهش یافت. علت آن را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش غلظت گلیسرول، پیوستگی بین زنجیرهای پروتئین افزایش می‌یابد و اجازه خروج مولکول‌های اکسیژن داده نمی‌شود. اما زمانی که غلظت گلیسرول از ۰/۵ به ۰/۷ گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته افزایش پیدا کرد، نفوذپذیری نسبت به اکسیژن هم به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به افزایش تحرک زنجیرها و ایجاد فضاهای خالی در ماتریکس پروتئین در نتیجه افزایش غلظت گلیسرول نسبت داد [۲۹]. با افزایش pH، نفوذپذیری نسبت به اکسیژن به طور معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0.05$). به دلیل این که با افزایش pH، برهم‌کنش‌های قطبی-یونی بین زنجیرهای جانبی افزایش یافت، به جز زمانی که pH از ۱۱ به ۱۲ رسید و به این ترتیب کاهش محسوسی مشاهده نشد. نتایج این تحقیق نشان داد که نفوذپذیری نمونه‌ها نسبت به اکسیژن در محدوده ۱/۵۸ و ۵/۶۶

است که تحرک زنجیره ها به دلیل جایگزینی برهمکنش های پروتئینی با برهمکنش های پروتئین - نرم کننده افزایش یابد. نفوذ پذیری و تحرک زنجیره های پروتئین دمای گذار شیشه را کاهش می دهد [۴۰].

نرم کننده با افزایش حجم آزاد پروتئین و به دنبال آن افزایش

Table 2 Demonstration of the effect of pH and glycerol concentration on the oxygen permeability of pistachio meal protein films

Film type	Plasticizer amount (g/gper)	Oxygen permeability (cm ³ .μ/cm ² .d.Kpa)
Sample (pH=10)	0.3	3.93±0.728 ^a
Sample (pH=10)	0.5	2.86±0.001 ^b
Sample (pH=10)	0.7	5.66±0.908 ^c
Sample (pH=11)	0.3	2.83±0.761 ^d
Sample (pH=11)	0.5	1.81±0.959 ^e
Sample (pH=11)	0.7	4.37 ±0.154 ^f
Sample (pH=12)	0.3	2.19±0.231 ^a
Sample (pH=12)	0.5	1.58±0.765 ^e
Sample (pH=12)	0.7	3.38±0.975 ^a

Lowercase letters in the column indicate significant differences at the 5% statistical level (P<0.05)

پروتئین گلیسرول و pH برابر ۱۱ انتخاب شد. بنابراین چنین فیلم هایی پتانسیل بالایی برای کاربردهای فیلم با حلالیت بالا با اعمال روش های اصلاح مختلف مانند افزودن سایر مواد پروتئینی می توانند داشته باشند. فیلم پروتئینی کنجاله پسته می تواند در آینده نزدیک کاربردهای متعددی در صنعت بسته بندی مواد غذایی داشته باشد.

تضاد منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

بیانیه تامین مالی

نویسنده اعلام می کند که هیچ گونه بودجه جداگانه ای برای این تحقیق دریافت نشده است.

مشارکت نویسندگان

تمام فعالیت ها توسط نویسندگان انجام شده است.

۴- نتیجه گیری

کنجاله پسته از جمله منابع ارزان، در دسترس و غنی از پروتئین است. فیلم های انعطاف پذیر از پروتئین کنجاله پسته در سطوح مختلف pH (۱۰، ۱۱ و ۱۲) و غلظت های مختلف نرم کننده گلیسرول (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷) گرم بر گرم پروتئین کنجاله پسته تهیه شدند. در این پژوهش نشان داده شد که با افزایش غلظت گلیسرول مقاومت به کشش و ازدیاد طول نمونه ها افزایش یافت، درحالی که مدول الاستیک کاهش پیدا کرد. افزایش pH باعث افزایش مقاومت به کشش، ازدیاد طول و مدول الاستیک فیلم های پروتئینی کنجاله پسته شد. نتایج خواص بازدارندگی نمونه های فیلم زیست تخریب پذیر حاکی از این بود که افزایش غلظت گلیسرول و pH کاهش معنی داری بر نفوذ پذیری نسبت به اکسیژن و بخار آب داشت. به طوریکه در pH برابر ۱۱ و سطح غلظت ۰/۵ گرم بر گرم پروتئین گلیسرول مقادیر نفوذ پذیری به اکسیژن و بخار آب به ترتیب $1/81 \text{ cm}^3.\mu/\text{cm}^2.\text{d.Kpa}$ و $87/86 \text{ g.mm/kpa.h.m}^2$ بودند. بر اساس یافته های این تحقیق، بهترین محلول برای تهیه فیلم زیست تخریب پذیر بر پایه پروتئین کنجاله پسته در سطح غلظت ۰/۵ گرم بر گرم

۵-منابع

- surface methodology. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 40, 10.
- [11] M. Yildirim-yalcin, F. Tornuk, O. Said. (2022). Recent advances in the improvement of carboxymethyl cellulose-based edible films. *Trends in Food Science & Technology*. 129, 179–193.
- [12] I. Sampaio, G.M. Maciel, D. Bortolini, I. A. Fernandes, W. Maroldi, A. Pedro, F. Fubio, Ch. Haminiuk. (2024). Sustainable innovations in edible films and coatings: An overview, 143, *Trends in Food Science & Technology*. 143, 104272.
- [13] Y. Zahedi, N. Sedaghat, B. Ghanbarzadeh. (2012). Physical properties of edible emulsified films from pistachio oil cake globulin protein and stearic acid. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 33, 18.
- [14] A. Fatemi, A. Najafi, R. Razavi, S. Jafarzadeh. (2024). Characterizing the antioxidant and antifungal properties of encapsulated pistachio hull extract in fenugreek seed gum to maintain the quality and safety of fresh pistachio. *Food Science & Nutrition*. 1–11.
- [15] B. Toghi-Eshghi, N. Sedaghat, M. Taghizadeh. (2018). Production and physical evaluation of an emulsified edible films based on wild pistachio (Baneh) protein with oleic acid. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 20, 18.
- [16] S. Kim, Z. Ustunol. (2001). Sorption isotherms of whey-protein-based edible films as influenced by lipid and plasticizer incorporation. *J. Agric. Food Chem.* 49, 4388–4391.
- [17] S. P. Bangar, W. S. Whiteside, A. O. Ashogbon, M. Kumar. (2021). Recent advances in thermoplastic starches for food packaging: A review. *Food Packaging and Shelf Life*. 30 (3).
- [18] S. Shojaei-Aliabadi, H. Hosseini, M.A. Mohammadifar, A. Mohammadi, S.M. Ojagh, S.M. Hosseini. (2013). Characterization of antioxidant-antimicrobial κ-carrageenan films containing Satureja hortensis essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 52, 1, 116–124.
- [19] C. Valenzuela, L. Abugoch, C. Tapia. (2013). Quinoa protein e chitosan e sun flower oil edible film: Mechanical, barrier and structural properties. *LWT - Food Science and Technology*. 50, 2, 531–537.
- [20] S. Bahram, M. Rezaei, M. Soltani, A. Kamali, S. M. Ojagh, M. Abdollahi. (2014). whey protein concentrate edible film activated with cinnamon essential oil. *Journal of Food Processing and Preservation*. 38, 1251–1258.
- [21] S. Saremnezhad, M. H. Azizi, M. Barzegar, S. Abbasi, E. Ahmadi. (2011). Properties of a
- [1] N. Sedaghat, F. Sanaei. (2022). A Review on the Packaging of Composite Biodegradable Plastics. *Journal of Packaging Science and Technology*, 13(1) 47-53.
- [2] M. Abbaspour, M. Esmaili, H. Almasi, F. Mohtarami, (2025). Production and investigation of properties of biodegradable antioxidant film based on zucchini flour containing chitosan nanoparticles loaded with Fennel essential oil, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 165, 22. DOI: 10.22034/FSCT.22.165.196.
- [3] M. Rezaei, S. Hedayati, M. Golmakani, N. Sedaghat. (2024). New electrospun nanofiber based on grass pea protein isolate (Lathyrus sativus L.) for the food and biomedical applications. *Iran Agricultural Research*, 43(1), 44–51.
- [4] M. Nabavi, M. Esmaili, A. Ghaitaranpour. (2025). *Lallemantia royleana* seed mucilage-based active edible films: The effects of zinc oxide nanoparticles and zoulang plant's essential oil. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 160, 22. DOI: 10.22034/FSCT.22.160.110.
- [5] S. Roy, R. Chawla, R. Santhosh, R. Thakur, P. Sarkar, W. Zhang. (2023). Agar-based edible films and food packaging application: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*. 141, 104198.
- [6] H. Nikbakht, A. Rajaei, M. Movahenejad. (2025). Investigating physical and mechanical properties of edible film based on pectin and whey protein, containing thyme essential oil using Pickering nanoemulsion method. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 164, 22. DOI: 10.22034/FSCT.22.164.132.
- [7] X. Li, F. Li, X. Zhang, W. Tang, M. Huang. (2024). Interaction mechanisms of edible film ingredients and their effects on food quality. *Current Research in Food Science*. 8, 100696.
- [8] Y. Zahedi, B. Ghanbarzadeh, N. Sedaghat. (2010). Physical properties of edible emulsified films based on pistachio globulin protein and fatty acids. *Journal of Food Engineering*. 100, 1, 102–108.
- [9] A. Aghababaei, S.A. Mortazavi, H. Tavakolpour. (2018). Effect of level oleic acid on physiochemical and mechanical properties of edible film corn zein. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 81, 15.
- [10] D. Sarmadizadeh, F. Badii, N. Maftoonzad, M.R. Ehsani, A. Ameri. (2013). Evaluating the effects of glycerol and sorbitol on the properties of edible soy protein-based films using response

- New Edible Film Made of Faba Bean Protein Isolate. *J.Agr.Sci.Tech.* 13, 181-192.
- [22] A. Oujifard. (2016). Effect of sucrose and sorbitol on properties of protein based-film from red tilapia (*Oreochromis niloticus*) fish. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 53, 149-159.
- [23] Sadeghi. S, Mohammadzadeh Milani. J, Esmailzadeh Kenari. R, Kasaei. M. R. (2019). Physicochemical and structural properties of edible films based on traction methods. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 89, 139-150.
- [24] B. Toghi-Eshghi, N. Sedaghat, M.Taghizadeh, M. (2018). Production and physical evaluation of an emulsified edible films based on wild pistachio (Baneh) protein with oleic acid. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 8, 223-234.
- [25] Y. Zahedi, N.Sedaghat, B.Ghanbarzadeh. (2010). Physical properties of edible emulsified films from pistachio oil cake globulin protein and stearic acid. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 33, 47-57.
- [26] G. Kumar C. Singh. (2022). Development of edible films from protein of brewer ' s spent grain : Effect of pH and protein concentration on physical , mechanical and barrier properties of films. *Applied Food Research*.2, 100043.
- [27] W. Qi, X. Tong, M. Wang, S. Liu, J. Cheng, H. Wang. (2024). International Journal of Biological Macromolecules Impact of soybean protein isolate concentration on chitosan-cellulose nanofiber edible films: Focus on structure and properties. *International Journal of Biological Macromolecules* 255, 128185 .
- [28] J. Chen, J. Chai, X. Chen, M. Huang, X. Zeng, X. Xu. (2023). Development of edible films by incorporating nanocrystalline cellulose and anthocyanins into modified myofibrillar proteins. *Food Chemistry*. 417, 135820.
- [29] C. Gan, J. Wang, Zh. Yuan, M. Cui, Sh. Sun, M. Alharbi, F. Alasmari, W. Du, X. Zhang. D. Yang. (2024). Polysaccharide- and protein-based edible films combined with microwave technology for meat preservation, *International Journal of Biological Macromolecules*. 270, 132233.
- [30] S. Khedri, E. Sadeghi, M. Rouhi, Z. Delshadian. (2021). Bioactive edible films : Development and characterization of gelatin edible films incorporated with casein phosphopeptides. *LWT Food Science and Technology*. 138, 110649.
- [31] Y. J. Jeon, H. Lee, S. C. Min. (2023). Effects of in-package atmospheric dielectric barrier discharge cold plasma treatment on the antimicrobial efficacy of whey protein isolate-based edible films that incorporate malic acid against Salmonella in chicken breast processed meat. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 85,103339.
- [32] P. J. A. Sobral, J. S. Santos, F. T. Garcı. (2005). Effect of protein and plasticizer concentrations in film forming solutions on physical properties of edible films based on muscle proteins of a Thai Tilapia. *Journal of Food Engineering*. 70, 93–100.
- [33] Gennadios, A., McHugh, T. H., Weller, C. L. and Krochta, J. M. (1994). Edible Coatings and Films Based on Proteins. In. *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. 201-277.
- [34] Z. Dehghan Shoar, F. Badii, H.Behmadi. (2011). Effect of glycerol addition on the mechanical and physical properties of soy protein isolate film. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 6, 1-10.
- [35] A. Prommakool, T. Sajjaanantakul, T. Janjarasskul, J. M. Krochta. (2011). Whey protein – okra polysaccharide fraction blend edible films: tensile properties , water vapor permeability and oxygen permeability. *J Sci Food Agric*. 91, 362–369, 2011.
- [36] L. Sharma , C. Singh. (2016). Food Hydrocolloids Sesame protein based edible films : Development and characterization. *Food Hydrocolloids*. 61, 139-147.
- [37] O. Orliac , A. Rouilly, F. Silvestre, L. Rigal (2003). Effects of various plasticizers on the mechanical properties , water resistance and aging of thermo-moulded films made from sunflower proteins. *Industrial Crops and Products*. 18, 91–100.
- [38] Y. Zahedi, N.Sedaghat, B.Ghanbarzadeh. (2010). Palmitic acid agent on mechanical, thermal and permeability properties of edible film Palmitic acid on mechanical, thermal and permeability properties of edible film Pistachiolglobulin. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 6, 91-99.
- [39] R. Sothornvit , J. M. Krochta. (2001). Plasticizer effect on mechanical properties of b - lactoglobulin films. *Journal of food Engineering*. 50, 149-155.
- [40] F. Abbasi Shahir, Z. Ahmadi, S. Mohammadi. (2020). A review of the effect of different plasticizers on the performance of whey protein-basedc films. *Packaging Science and art*. 41, 50-59.



Scientific Research

Production of biodegradable film based on pistachio protein and investigation of its physicochemical properties

Farima Aghaee¹, Nasser Sedaghat^{2*}, Narges Jannatiha³, Ali Sharif⁴

1- MSc student, Department of Food Sciences and Technology, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2*- Professor, Department of Food Sciences and Technology, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Ph.D student, Department of Food Sciences and Technology, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Assistant Professor, Department of Food Sciences and Technology, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2026/02/01

Review: 2026/05/31

Accepted: 2026/06/06

Keywords:

Protein,

Mechanical properties,

Barrier properties,

biodegradable film,

Pistachio meal

DOI: 10.48311/fsct.2026.118542.83046

*Corresponding Author E-

sedaghat@um.ac.ir

Pistachio meal constitutes the major part of the by-products of pistachio oil extraction (more than 60%). Pistachio meal contains compounds with nutritional value including protein, minerals and vitamins. Pistachio meal is likely to be a rich source of protein. The aim of this study was to produce biodegradable film from pistachio meal protein and the effect of glycerol treatments at three levels (0.3, 0.5 and 0.7) microscopically. The results of mechanical properties showed that with increasing glycerol concentration, tensile strength and elongation increased, while elastic modulus decreased ($P < 0.05$). Increasing pH increased tensile strength, elongation, and elastic modulus ($P < 0.05$). Investigation of the barrier properties of biodegradable film samples showed that increasing glycerol concentration and pH had a significant effect on permeability to oxygen and water vapor ($P < 0.05$). With increasing glycerol concentration and pH, permeability to oxygen and water vapor decreased ($P < 0.05$). In studying the morphology of the structure of different biodegradable films, the physicochemical properties of the samples were completely consistent with the obtained micrographs. Therefore, the optimal film based on pistachio meal protein was selected at a concentration level of 0.5 g/g protein glycerol and pH of 11.