

## بررسی خصوصیات اولیه فیلم چند لایه بر پایه نشاسته و موم زنبور عسل

مهران خلیلی دهکردی<sup>۱</sup>، هومان مولوی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

\* مسؤول مکاتبات: [hmolavi2010@yahoo.com](mailto:hmolavi2010@yahoo.com)

### چکیده

نشاسته یکی از فراوانترین بیوپلیمرهای کربوهیدراتی است که ویژگی تشکیل فیلم بسیار خوبی دارد. با این حال، مقاومت کم آن نسبت به بخار آب و ویژگی‌های مکانیکی ضعیف، از مشکلات اصلی این پلیمر است. یکی از روش‌های نوید بخش برای بهبود عملکرد این فیلم‌ها تولید فیلم‌های چند لایه است که سبب جبران بخشی از ضعف‌های بیوپلیمرها می‌شود. موم زنبور عسل با خاصیت هیدروفوب بالا بهترین چربی برای بهبود ویژگی‌های ممانعت‌کنندگی در برابر رطوبت فیلم‌ها می‌باشد. در این تحقیق فیلم‌های چند لایه نشاسته/موم زنبور عسل به روش قالب‌ریزی تولید و ویژگی‌های آن شامل نفوذپذیری نسبت به بخار آب، حلالیت در آب و اسید، درصد جذب رطوبت، خواص مکانیکی و نیز ویژگی‌های ظاهری مورد مطالعه و با فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر تک‌لایه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که موم زنبور عسل باعث افزایش ضخامت فیلم‌ها، افزایش استحکام کششی در فیلم، مقاومت بیشتر در برابر پارگی و افزایش بلورینگی در فیلم شد و همچنین موم زنبور عسل باعث کاهش رطوبت در فیلم، کاهش آب جذب شده در فیلم، کاهش حلالیت در آب و اسید و همچنین کاهش نفوذپذیری نسبت به بخار آب شد. ضخامت فیلم‌هایی که دولایه نشاسته گندم داشتند (گندم-موم-گندم) از ضخامت فیلم‌هایی که دولایه نشاسته سیب‌زمینی (سیب‌زمینی-موم-سیب‌زمینی) داشتند بیشتر بود در حالی که ترتیب لایه‌ها (سیب‌زمینی-موم-گندم) یا (گندم-موم-سیب‌زمینی) تفاوت معناداری ایجاد نمی‌کردند. فیلم‌های چندلایه در مقایسه با فیلم‌های تک‌لایه رطوبت و آب جذب شده کمتری را جذب کردند و هرچقدر رطوبت و جذب آب کمتر باشد، خصوصیات فیلم نیز بهتر می‌شود. به صورت کلی اگر برآیند ویژگی‌ها را در نظر بگیریم، فیلم نشاسته گندم به علت ضخامت بیشتر و میزان جذب آب و رطوبت کمتر در مقایسه با فیلم نشاسته سیب‌زمینی مناسب‌تر است.

**واژگان کلیدی:** فیلم چندلایه - موم زنبور عسل - نشاسته

### ۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته استفاده از فیلم‌های سنتزی و پلاستیکی به خاطر توسعه روز افزون صنایع پتروشیمی بسیار افزایش داشته است که منجر به بروز مشکلات بسیار جدی برای طبیعت می‌شود. این نوع فیلم‌های سنتزی با توجه به ماهیت غیر زیست تخریب‌پذیری که دارند کامل بازیافت نمی‌شوند و یا بسیار بازیافت آنها زمان‌بر است. حتی مکان‌های لازم برای دفع این نوع زباله‌ها وجود ندارد و همچنین باعث آلودگی دریاها و اقیانوس‌ها نیز می‌شوند (۶). فیلم‌های خوراکی راه حل مناسبی برای رفع این مشکل هستند (۴).

فیلم‌های خوراکی لایه نازکی از بیوپلیمرها هستند که برای بهبود و نگهداری مواد غذایی روی سطح ماده‌ی غذایی کشیده می‌شوند و یا بین اجزای ماده غذایی قرار داده می‌شوند (۴). مهمترین مزیت این نوع فیلم‌ها این است که تجزیه پذیر هستند. فرایند بازیافت بسیار پرهزینه است و در طی فرایند کمپوست به محصولات طبیعی مثل آب، دی اکسید کربن و ... تبدیل می‌شوند و سمی نیستند. همچنین برای محیط زیست خطرناک نمی‌باشند (۱۵).

در این میان نشاسته به دلیل قیمت پایین، فراوانی زیاد و در دسترس بودن، قابلیت بازیافت و همچنین قابلیت فیلم سازی خوبی که دارد (مانع ورود اکسیژن و دی اکسید کربن می‌شود) بسیار حائز اهمیت می‌باشد و می‌توان در بسته بندی‌های خوراکی از آن استفاده کرد (۱۷). نشاسته یک‌سری معایب نیز دارد و بخاطر همین معایب به تنهایی نمی‌شود از آن فیلم تهیه کرد. این معایب عبارتند از: خاصیت آبدوستی بالا و ضعف در برابر رطوبت (مهمترین ویژگی فیلم با پوشش خوراکی، مقابله با انتقال رطوبت است) و خواص مکانیکی که یکی از راه‌حلهای برای حل این مشکل استفاده از فیلم‌های چندلایه است (۷).

با افزودن لیپیدها به فرمولاسیون پوشش‌های پروتئینی و یا پلی‌ساکاریدی، نفوذپذیری به بخار آب کاهش می‌یابد (۵). موم زنبور عسل یکی از مواردی است که میتوان به فیلم‌های خوراکی اضافه کرد. در کنار مزایای فوق، با اضافه کردن ترکیبات لیپیدی خواص ظاهری فیلم تغییر می‌کند و مقاومت مکانیکی فیلم‌ها هم کاهش می‌یابد. مواد اصلی برای تشکیل موم زنبور عسل کربوهیدرات‌هایی مانند فروکتوز، گلوکز و ساکارز هستند. موم با خاصیت هیدروفوبی بالا مهمترین چربی برای بهبود ویژگی‌های ممانعت کنندگی در برابر رطوبت فیلم‌ها می‌باشد (۸). موم در آب غیر محلول است و خواص آن با گذشت زمان تغییری نمی‌کند.

بنابراین، هدف از مطالعه حاضر تولید فیلم چند لایه با استفاده از پلیمرهای نشاسته و موم زنبور عسل به روش قالب‌ریزی و بررسی ویژگی‌های فیلم از جمله خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم چند لایه در مقایسه با فیلم‌های تک لایه می‌باشد، امید است نتایج حاصل از آن بتواند رویکرد جدیدی به سوی استفاده از بسته‌بندی‌های زیست تخریب پذیر در صنایع غذایی جهت بهبود کیفیت، ایمنی و کاهش زباله‌های حاصل از غذا به حساب آید.

## ۲- مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده شامل نشاسته سیب زمینی، نشاسته گندم و موم زنبور عسل بود که از بازار داخلی ایران تهیه شدند. مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمون‌های شیمیایی (گلیسرول، کلسیم کلراید و نیترات منیزیم) از شرکت سیگما و مرک آلمان و با خلوص تجزیه‌ای تهیه شدند.

### ۲-۱- آماده‌سازی موم زنبور عسل

۱۰ گرم از موم در بشر ریخته و به نسبت ۱ به ۱۰ آب اضافه گردید و سپس در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا کاملاً ذوب شود، (دلیل استفاده از این درجه حرارت از دست رفتن خواص موم در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد)، سپس موم ذوب شده از صافی عبور داده شد و سپس به دستگاه اولتراسونیک (کلینر، مدل LX ساخت ایران) با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد انتقال داده شده تا ذرات و ناخالصی‌های کوچک باقی مانده نیز جداسازی گردند. در ادامه موم سرد شده و جهت استفاده در فرمولاسیون فیلم نگهداری گردید (۲).

## ۲-۲- آماده سازی فیلم چند لایه

برای تولید فیلم، ابتدا ۳ گرم نشاسته در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر به همراه ۴۰ درصد گلیسرول (۱/۸ گرم) با هم مخلوط، سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد در حمام آب گرم همزده شد. در ادامه، مخلوط فیلم روی پلکسی گلاس پهن و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت تا فیلم خشک شود. سپس موم زنبور عسل ذوب شده به صورت لایه ای نازک روی فیلم پلی ساکارییدی ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت برای خشک شدن در دمای ۵۰ قرار گرفت تا تشکیل فیلم دو لایه (یک لایه نشاسته، یک لایه موم زنبور عسل) بدهد و سپس مجدداً یک لایه از نشاسته بر روی لایه دوم قرار داده شد تا تشکیل فیلم سه لایه (یک لایه موم بین دو لایه نشاسته) را بدهد. فیلم نشاسته گندم و نشاسته سیب زمینی نیز به عنوان فیلم های شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس فیلم های شفاف و پیوسته برای انجام آزمون ها از سطح ظروف جدا شد (۹).

## ۲-۳- اندازه گیری ضخامت

میانگین ضخامت فیلم ها به وسیله یک میکرومتر دستی با دقت ۰/۰۱ میلی متر در ۱۰ نقطه تصادفی اندازه گیری شد (۱۰).

## ۲-۴- اندازه گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه ها در سه تکرار بر اساس مقدار افت وزن نمونه مشخصی از فیلم در طی خشک کردن در آون آزمایشگاهی (مدل ۷۰، ساخت ایران) در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد و مطابق رابطه ۱ اندازه گیری شد (۱۱).

$$\text{رابطه ۱:} \quad \text{درصد رطوبت} = 110 \times \frac{w_1 - w_2}{w_0}$$

که در این رابطه،  $W_1$  وزن ظرف و نمونه قبل از خشک کردن،  $W_2$  وزن ظرف و نمونه بعد از خشک کردن و  $W_0$  وزن اولیه نمونه است.

## ۲-۵- اندازه گیری جذب آب

آزمون اندازه گیری جذب آب بر اساس اختلاف وزن نمونه ها قبل و بعد از مشروط سازی در رطوبت نسبی ۵۰-۵۵ درصد تعیین شد. قطعات  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  فیلم ها تا رسیدن به وزن ثابت ( $m_1$ ) در محیطی با رطوبت نسبی صفر درصد (کلرید کلسیم) نگهداری شده، آنگاه نمونه ها در دسیکاتور حاوی محلول اشباع نیترات منیزیم با رطوبت نسبی ۵۰-۵۵ درصد تا رسیدن به وزن ثابت ( $m_2$ ) نگهداری و میزان جذب آب نمونه ها به کمک رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۲:} \quad \text{میزان جذب آب} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

## ۲-۶- حلالیت در آب و اسید

ابتداء فیلم ها در ابعاد  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  بریده و سپس وزن اولیه نمونه ها مشخص شد، که برای این منظور فیلم ها در درون بشرها توزین و به وزن ثابت رسیده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه خشک گردید. سپس با تفریق وزن بشر وزن نمونه خشک بدست آمد. در هر بشر به میزان ۵۰ میلی لیتر آب برای حلالیت در آب و همین میزان نیز در بشرهای حاوی نمونه های حلالیت در اسید ریخته شد و سپس نمونه ها در در دمای ۲۵ درجه به مدت ۲۴ ساعت در آون شیکردار (مدل DS ۳۱۱ آلمان) قرار گرفت، سپس

آب و اسید از نمونه‌های فیلم جدا شد و دوباره باقیمانده‌ی فیلم‌ها در دمای ۱۰۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت در آون دارای فن خشک شد و مجدداً وزن فیلم‌ها یادداشت گردید، اختلاف وزن خشک اولیه و ثانویه نشان دهنده میزان حلالیت نمونه‌ها در آب و اسید است حلالیت در آب و اسید از رابطه ۳ محاسبه شد (۱۲).

$$\text{رابطه ۳: درصد حلالیت} = \frac{M1-M2}{M1} \times 100$$

## ۲-۷- نفوذپذیری نسبت به بخار آب (WVP)

آزمون نفوذپذیری به بخار آب مطابق روش ASTM (1995-method E96) به صورت وزن سنجی انجام شد (ASTM, 1995). برای انجام آزمایش، درون ویال‌هایی کلرید کلسیم خشک ریخته شد. نمونه فیلم‌ها به صورت گرد بریده و در دهانه ویال به وسیله چسب دو طرفه چسبانده شد. به این ترتیب درون ویال‌ها رطوبت نسبی صفر درصد وجود داشت. آنگاه ویال‌ها درون دسیکاتور حاوی آب نمک اشباع با رطوبت نسبی ۷۵٪ و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. به این ترتیب اختلاف فشار بخار آب ۱۷۵۵/۵۵ پاسکال در دو سمت فیلم ایجاد شد. در بازه زمانی ۲۴ ساعت، هر ساعت یک بار ویال‌ها به وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم وزن شد و نمودار افزایش وزن ویال در برابر زمان رسم شد و با استفاده از روابط ۴ و ۵ آهنگ عبور بخار آب (WVTR) و نفوذپذیری نسبت به بخار آب (WVP) محاسبه شد:

$$\text{رابطه ۴: } WVTR = \frac{S}{A}$$

$$\text{رابطه ۵: } WVP = \frac{WVTR \times X}{\Delta P}$$

S شیب منحنی افزایش وزن ویال در برابر زمان، A مساحت دهانه ویال، X میانگین ضخامت فیلم و  $\Delta P$  اختلاف فشار بخار در دو سوی فیلم معادل ۱۷۵۵/۵۵ پاسکال است.

## ۲-۸- اندازه‌گیری خواص مکانیکی فیلم‌ها

ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های فیلم از طریق آزمون‌های کششی با استفاده از یک دستگاه ارزیابی مکانیکی (مدل CT3 ساخت آمریکا) و بر اساس روش استاندارد (ASTMD882-10, 1996) تعیین شد (ASTM, 1996). ابتدا فیلم‌ها به شکل مستطیل با طول ۱۰۰ mm و عرض ۱۰ mm بریده شدند. نمونه‌ها در دسیکاتور حاوی محلول اشباع نیترات منیزیم با رطوبت نسبی ۵۵-۵۰ درصد به مدت حداقل ۴۸ ساعت مشروط شده و فاصله بین دو فک دستگاه ۵۰ mm و سرعت حرکت فک‌ها ۱۰ mm/min انتخاب شد. فاکتورهای شامل استحکام کششی (TS)، درصد ازدیاد طول در نقطه شکست (EB)، با استفاده از روابط ۶ و ۷ محاسبه شد:

$$\text{رابطه ۶: } S = F_{max}$$

$$\text{رابطه ۷: } EB \ L_{max} = \times 100$$

که در این روابط حداکثر نیروی اعمال شده قبل از پاره شدن،  $A_{Min}$  حداقل سطح مقطع نمونه،  $L_{Max}$  طول نمونه در لحظه پاره شدن است.

## ۹-۲- اندازه گیری رنگ

برای اندازه گیری رنگ از دستگاه کالریمتر (Hunterlab EZ colorfelex)، کشور آمریکا استفاده شد. نمونه‌ها با ابعاد مشخص تهیه شده و در صفحه سفید استاندارد قرار گرفته و پارامترهای  $L^*$  (شفافیت-کدورت)،  $a^*$  (قرمزی-سبزی) و  $b^*$  (آبی-زردی) اندازه گیری گردید. همه اندازه گیری‌ها در چهار تکرار انجام شد. اختلاف رنگ کلی صفحه سیاه استاندارد و نمونه‌ها ( $\Delta E$ )، اندیس سفیدی (WI) و اندیس زردی (YI) توسط فرمول‌های ۸ الی ۱۰ محاسبه گردید (۴).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad \text{رابطه ۸:}$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad \text{رابطه ۹:}$$

$$YI = \frac{86.142 \times b}{L} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

## ۱۰-۲- اندازه گیری خصوصیات سطحی فیلم

برای این آزمون ابتدا نمونه‌های موردنظر در ابعاد  $2 \times 2$  سانتی متر مربع برش داده شد و سپس با طلا پوشش دهی شد و در آون خلأ دستگاه میکروسکوپ الکترونی (Zeiss ساخت آلمان) قرار گرفت و با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر از سه نقطه مختلف فیلم تصویربرداری شد (۴).

## ۱۱-۲- آزمون XRD

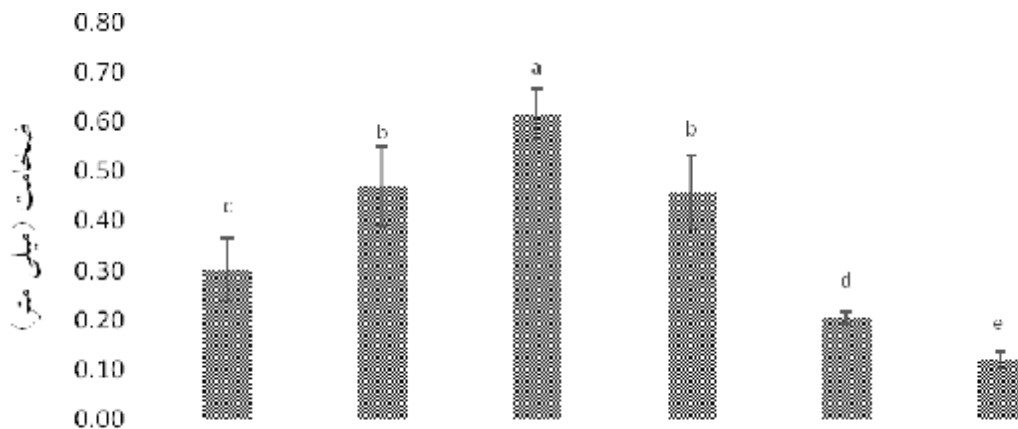
فیلم‌ها با استفاده از پراش سنج فیلیپس (مدل PW ۱۸۳۰) در معرض تابش پرتو ایکس قرار گرفتند، که در آن طول موج تابش برابر با  $1.79018$  آنگستروم، ولتاژ  $40$  کیلو ولت، شدت جریان  $30$  میلی آمپر و فاصله نمونه برداری  $0.02$  بود. تشعشع پراکنده در محدوده زاویه ای  $10-35$  درجه تشخیص داده شد (۱۴).

## ۱۲-۲- آنالیز آماری

در این تحقیق به منظور بررسی خصوصیات اولیه فیلم چند لایه بر پایه نشاسته و موم زنبور عسل از طرح بلوک کاملاً تصادفی با سه تکرار، آنالیز واریانس و سپس آزمون دانکن در سطح اطمینان  $95$  درصد به کمک نرم افزار SPSS ویرایش  $22$  استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۱-۳- اندازه گیری ضخامت



شاهد سیب زمینی شاهد گندم، موم، سیب زمینی موم، گندم سیب زمینی، موم-سیب زمینی، سیب زمینی-موم-گندم، گندم-موم-گندم، سیب زمینی

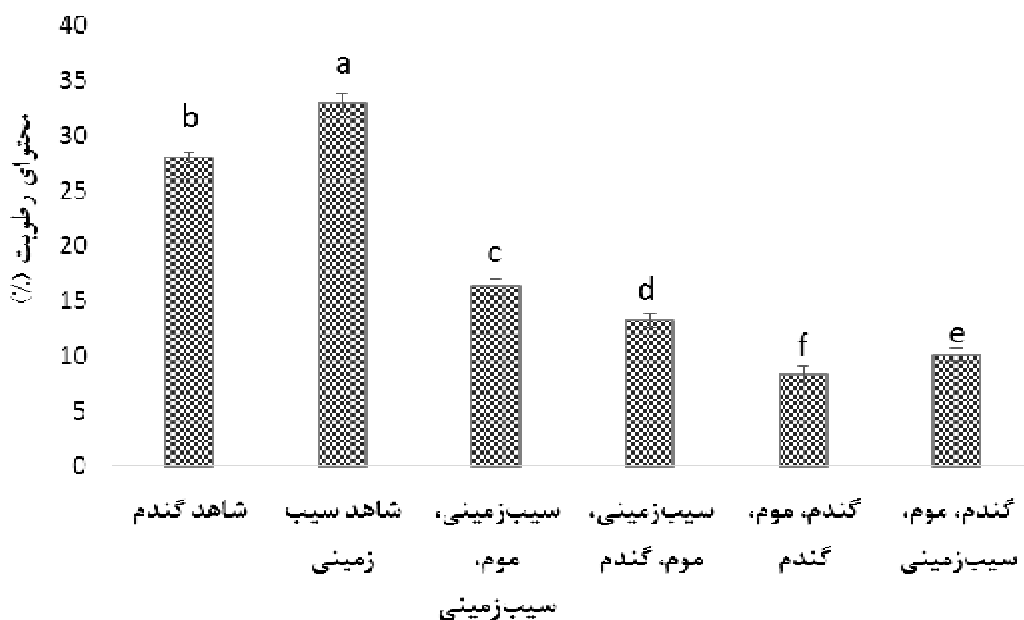
شکل ۱- مقایسه میانگین ضخامت فیلم در تیمارهای مورد بررسی.

\* میانگین‌هایی که حروف مشابه ندارند، از نظر آزمون دانکن (در سطح احتمال پنج درصد) اختلاف معنی داری با یکدیگر دارند.

شکل ۱ میانگین ضخامت در چهار فیلم حاصل از نشاسته سیب زمینی-موم-سیب زمینی، سیب زمینی-موم-گندم، گندم-موم-گندم و گندم-سیب زمینی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت فیلم‌های شاهد کمتر از فیلم‌های حاوی موم بود. ضخامت فیلم‌های شاهد سیب زمینی ( $0/02 \pm 0/12 \text{ mm}$ ) نسبت به فیلم شاهد گندم ( $0/01 \pm 0/21 \text{ mm}$ ) کمتر بود. دلیل این کاهش ضخامت در فیلم نشاسته سیب زمینی به نوع منبع نشاسته و نسبت محتوای آمیلوز/آمیلوپکتین مرتبط است. هر چه محتوای آمیلوز کمتر باشد، ضخامت فیلم، کمتر است (۷). چون ساختار آمیلوز دارای ساختار خطی است و فضای بیشتری را اشغال می‌کند ولی آمیلوپکتین به جهت این که زنجیره‌های جانبی دارند، این زنجیره‌های جانبی در هم فرو می‌روند (۱).

در بین تیمارهای حاوی موم، فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم با میزان ( $0/05 \pm 0/62 \text{ mm}$ ) بیشترین میزان ضخامت را داشت که ناشی از حضور دو لایه نشاسته گندم بوده است و کمترین ضخامت بین نمونه‌های حاوی موم، فیلم مربوط به نشاسته سیب زمینی-موم-سیب زمینی با میزان ( $0/06 \pm 0/30 \text{ mm}$ ) بود. همچنین تفاوت معنی داری بین فیلم نشاسته سیب زمینی-موم-گندم و نشاسته گندم-موم-سیب زمینی وجود نداشت.

ضخامت فیلم تأثیر مستقیم بر دیگر پارامترهای اساسی فیلم‌ها دارد. منابع مختلف و نسبت‌های مختلف آمیلوز و آمیلوپکتین باعث بروز خصوصیات فیزیکی متفاوتی در فیلم‌ها می‌شود (۲). منشأ نشاسته بر ضخامت فیلم تأثیر می‌گذارد. با آمیلوز بیشتر، لایه‌ها ضخیم‌تر میشوند و با میزان کمتر، نازک‌تر هستند. بنابراین فیلم‌های حاصل از نشاسته گندم به علت محتوای بیشتر آمیلوز، ضخامت بیشتری دارند. افزودن یک لایه موم زنبورعسل در هر دو منبع منجر به افزایش لایه و در نتیجه افزایش ضخامت فیلم شده است (۱۳). مهدیان و همکاران (۱۳۹۹) خصوصیات فیلم خوراکی بر پایه نشاسته سیب زمینی و گندم/ژلاتین را بررسی کردند (۴). نتایج این محققین مطابق با تحقیق حاضر بود. ضخامت فیلم‌های نشاسته گندم بیشتر از فیلم‌های با نشاسته سیب زمینی بود. نتایج باسیاک و همکاران (۲۰۱۷) با تحقیق حاضر مطابقت داشت (۷).



شکل ۲- مقایسه میانگین رطوبت در فیلم در تیمارهای مورد بررسی.

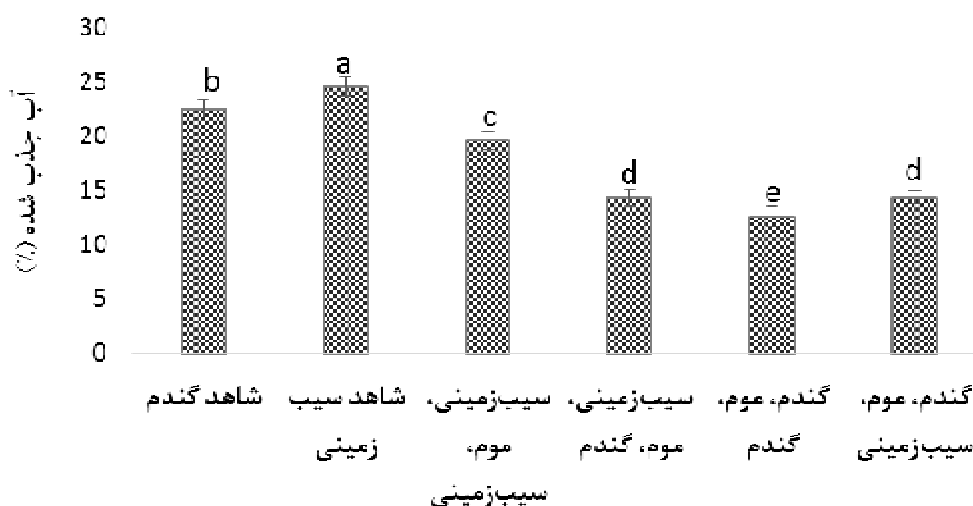
\* میانگین‌هایی که حروف مشابه ندارند، از نظر آزمون دانکن (در سطح احتمال پنج درصد) اختلاف معنی‌داری با یکدیگر دارند.

شکل ۲ میزان محتوای رطوبت را در فیلم‌های مختلف نشان می‌دهد. نمونه‌های شاهد (فیلم تهیه شده با نشاسته گندم و فیلم تهیه شده با نشاسته سیب زمینی) نسبت به تمام نمونه‌های حاوی موم زنبور عسل، با اختلاف معنی‌داری دارای بیشترین محتوای رطوبت بودند ( $p < 0.05$ ). کمتر بودن محتوای رطوبت فیلم‌های حاوی موم در مقایسه با نمونه‌های شاهد، به دلیل حضور ترکیبات لیپیدی در بستر شبکه‌ای پلیمر، بهبود ویژگی آبگریزی فیلم و در نتیجه جلوگیری از حضور مولکول‌های آب در فیلم می‌باشد. زیرا موم-زنبور عسل ماهیت آبگریز دارد و ساختار متراکم آن باعث کاهش میزان رطوبت در فیلم حاصل از آن می‌شود. همچنین پر شدن فضاهای خالی موجود توسط ترکیب چربی مانند موم نیز می‌تواند دلیل دیگری برای این پدیده باشد. در واقع می‌توان گفت با حضور موم نسبت جایگاه‌های فعال قطبی برای جذب مولکول‌های آب در ساختار نشاسته کاهش می‌یابد. بنابراین افزودن موم زنبور عسل اثر مثبتی در ویژگی فیلم‌های برپایه نشاسته ایجاد کرده است. نتایج این تحقیق با دیانا و همکاران (۲۰۲۱) که تاثیر افزودن موم زنبور عسل را بر فیلم نشاسته مورد بررسی قرار دادند، مطابقت داشت. آنها در مطالعه خود، علت کاهش محتوای رطوبت فیلم‌ها را ناشی از خاصیت آبگریزی موم گزارش کردند (۱۲). همچنین هرومیس و همکاران (۲۰۱۵) نیز نتایج مشابهی در رابطه با اثر موم زنبور عسل بر کاهش محتوای رطوبتی فیلم کیتوزان گزارش کردند. آنها گزارش کردند که با افزایش درصد موم، محتوای رطوبت فیلم کیتوزان تا ۲٪ کاهش یافت (۲۳). در تحقیق مشابه دیگری، کلانگمونگ و سودورنویت (۲۰۱۶) گزارش

کردند که افزودن موم زنبور عسل به فیلم هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز باعث کاهش محتوای رطوبت فیلم حاصل می‌شود که به دلیل خاصیت آبرگری موم می‌باشد (۲۴).

همچنین، بررسی مطابق با نتایج فیلم شاهد نشاسته سیب‌زمینی ( $0.187 \pm 0.033$ ٪) دارای محتوای رطوبت بالاتری نسبت به فیلم شاهد گندم ( $0.128 \pm 0.005$ ٪) داشت ( $p < 0.05$ ). دلیل این افزایش محتوای رطوبت در فیلم شاهد نشاسته سیب‌زمینی مقادیر بالاتر مونو استرهای فسفات در نشاسته سیب‌زمینی در مقایسه با نشاسته سایر غلات است. این استرهای فسفات عمدتاً رو شاخه‌های آمیلوپکتین قرار گرفته‌اند در نتیجه موجب افزایش محتوای آب نشاسته سیب‌زمینی می‌شود (۲۳). همچنین در مورد فیلم‌های سه لایه نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته سیب‌زمینی و فیلم‌های سه لایه نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم به ترتیب بیشترین ( $0.163 \pm 0.016$ ٪) و کمترین ( $0.183 \pm 0.016$ ٪) محتوای رطوبت را داشتند. نتایج مشابهی توسط دومو-لیز (۲۰۱۹) و پرز-ورگا و همکاران به دست آمد (۳۰).

### ۳-۳- اندازه‌گیری آب جذب شده



شکل ۳- مقایسه میانگین میزان آب جذب شده در تیمارهای مورد بررسی.

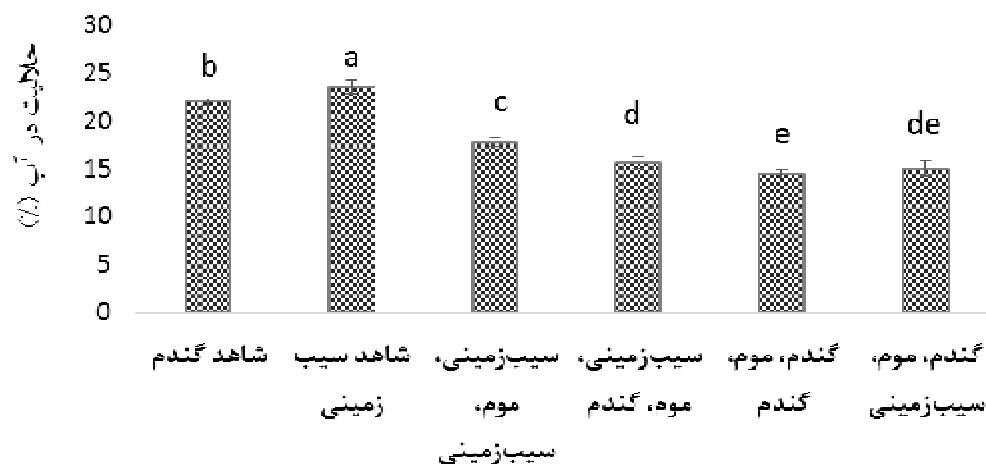
\* میانگین‌هایی که حروف مشابه ندارند، از نظر آزمون دانکن (در سطح احتمال پنج درصد) اختلاف معنی‌داری با یکدیگر دارند.

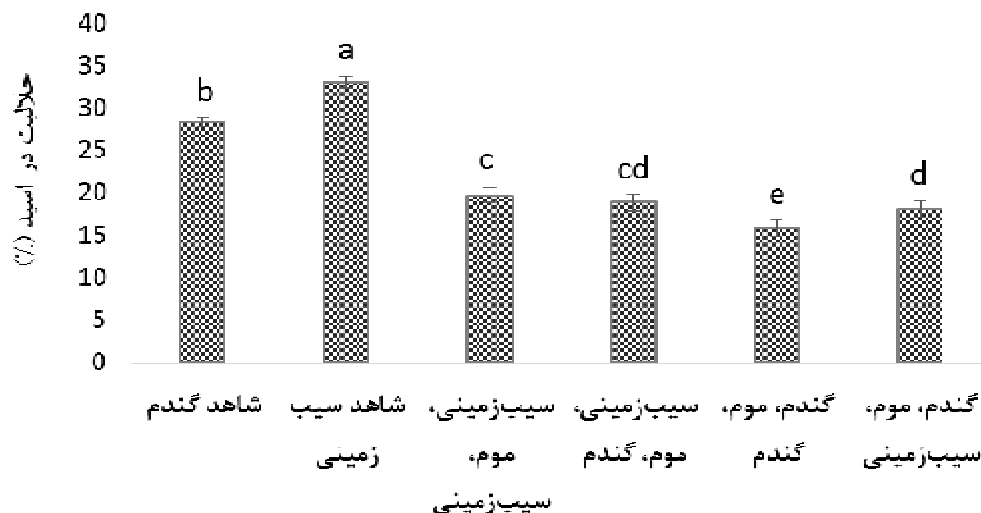
شکل (۳) میانگین آب جذب شده در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج، تفاوت معنی‌داری بین میزان آب جذب شده نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی موم مشاهده شد ( $p < 0.05$ ). به این صورت که نمونه‌های شاهد جذب آب بالاتری نسبت به تیمارهای حاوی موم داشتند. در تحقیقات مشابهی گزارش شده است که افزودن موم منجر به کاهش جذب آب در فیلم‌های تهیه شده با پولولان و هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز شده است که ناشی از گروه‌های آبرگری موم می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج دیانا و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت داشت. همچنین فیلم شاهد نشاسته سیب‌زمینی ( $0.2461 \pm 0.081$ ٪) از فیلم شاهد گندم ( $0.183 \pm 0.016$ ٪) جذب آب بالاتری داشت که همانطور که در قسمت قبل اشاره شد به نوع نشاسته و ویژگی‌های



ساختاری آن بستگی داشت. نتایج این تحقیق با نتایج عبدالهی مقدم و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت داشت. آنها گزارش کردند که فیلم‌های نشاسته سیب‌زمینی دارای مقدار جذب رطوبت بیشتری نسبت به فیلم‌های نشاسته گندم و ذرت داشت که این به دلیل ویژگی‌های ساختاری سیب‌زمینی از جمله دارا بودن محل‌های جذب رطوبت بیشتر (به دلیل داشتن محتوای آمیلوپکتین بیشتر نسبت به نشاسته‌های گندم و ذرت) می‌باشد. مقایسه فیلم‌های حاوی موم نیز نشان داد که فیلم‌های سه لایه نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته سیب‌زمینی ( $19/87 \pm 0/82$ ٪) به دلیل حضور دو لایه نشاسته سیب‌زمینی جذب آب بالاتری نسبت به سایر فیلم‌های حاوی موم داشت. از این رو فیلم‌های سه لایه نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم ( $12/58 \pm 0/96$ ٪) کمترین میزان جذب آب را داشتند. نتایج مشابهی توسط پرز-ورگا و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی میزان آب جذب شده در فیلم‌های نشاسته کاساوا و موم‌زنبورعسل به دست آمد.

### ۳-۴- اندازه‌گیری حلالیت در آب و اسید





شکل ۴- مقایسه میانگین حلالیت در آب و اسید در تیمارهای مورد بررسی.

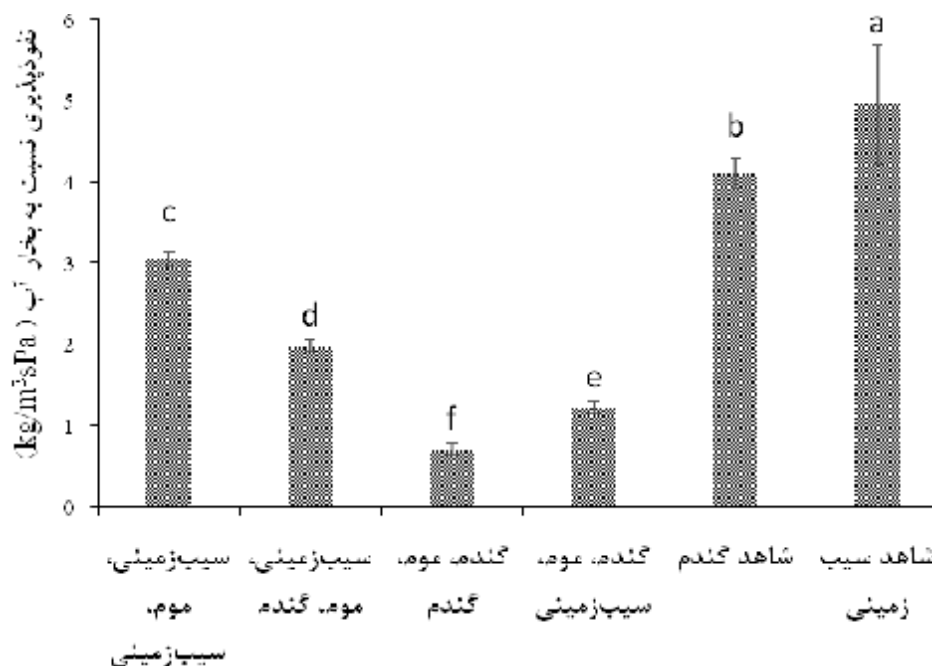
\* میانگین‌هایی که حروف مشابه ندارند، از نظر آزمون دانکن (در سطح احتمال پنج درصد) اختلاف معنی‌داری با یکدیگر دارند.

حلالیت از جمله ویژگی‌های مهم در فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر است که می‌تواند تعیین‌کننده قابل‌اجرا بودن و کاربرد آنها است (۶). شکل (۴) میانگین حلالیت در آب فیلم‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج، نمونه‌های شاهد (فیلم نشاسته گندم و نشاسته سیب زمینی) با اختلاف معنی‌داری بیشترین حلالیت را در آب داشتند ( $p < 0/05$ ). میزان حلالیت در آب فیلم شاهد گندم کمتر از فیلم شاهد سیب زمینی بود ( $p < 0/05$ ). افزودن موم-زنبورعسل منجر به کاهش حلالیت فیلم‌های بر پایه نشاسته در آب شد. همچنین اختلاف معنی‌داری بین حلالیت در آب در فیلم‌های سیب زمینی-موم-گندم و گندم-موم-گندم مشاهده شد ( $p < 0/05$ ). بیشترین حلالیت در آب در فیلم نشاسته سیب زمینی-موم-سیب زمینی ( $0/49 \pm 17/78$ ٪) و کمترین حلالیت در فیلم نشاسته گندم-موم-گندم ( $0/47 \pm 14/46$ ٪) مشاهده گردید ( $p < 0/05$ ). علت کاهش حلالیت فیلم‌های حاوی موم-زنبورعسل در مقایسه با نمونه‌های شاهد، ساختار آبنگیز موم است. زیرا موم در ساختار شبکه‌ای فیلم نفوذ کرده و با اتصالات هیدروژنی، فعل و انفعالات قوی ایجاد کرده و نفوذپذیری فیلم را به مولکول‌های آب کاهش داده و باعث کاهش حلالیت فیلم می‌شود (۲۵). نتایج این تحقیق با نتایج پرز-ورگارا و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت داشت. این محققین گزارش کردند که فیلم‌های نشاسته کاساوا بیشترین میزان حلالیت را دارند و با افزایش میزان موم در ساختار فیلم‌های نشاسته کاساوا، میزان حلالیت نیز در آب کاهش یافت. نتایج مشابهی نیز توسط دیانا و همکاران (۲۰۲۱) در مورد کاهش حلالیت فیلم‌های نشاسته کاساوا-موم-زنبورعسل در آب گزارش شد. افزودن موم به پلیمر نشاسته منجر به تشکیل یک شبکه قوی از اتصالات نشاسته-موم شده و در نتیجه دسترسی گروه‌های هیدروکسیل برای واکنش با آب کاهش می‌یابد (۲۰). در مطالعه مشابه دیگری، اوچوا و همکاران (۲۰۱۷) به کاهش حلالیت در آب فیلم‌های نشاسته ذرت حاوی موم-زنبورعسل اشاره کردند (۲۸). همچنین تفاوت حلالیت فیلم‌های مختلف نشاسته به دلیل تاثیر نوع نشاسته و ساختار آن می‌باشد. همانطور که فخوری و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی مشابه گزارش کردند که فیلم‌های بر پایه نشاسته بسته به نوع منبع، حلالیت متفاوتی را از خود نشان می‌دهند (۱۵). زاوارز و همکاران (۲۰۱۰) نیز در پژوهشی دیگر، ارتباط بین ویژگی

حلالیت و متورم شدن گرانول‌ها را گزارش کردند. به عبارتی متورم شدن گرانول‌ها بر حلالیت نشاسته نیز تاثیرگذار است و هر چقدر ساختار نشاسته متراکم‌تر باشد، متورم شدن کمتر و در نتیجه حلالیت نیز کاهش می‌یابد.

همچنین شکل (۴) حلالیت فیلم‌های مختلف را در اسید نشان می‌دهد. مطابق با نتایج، نمونه‌های شاهد با اختلاف معنی‌داری بیشترین حلالیت را در اسید داشتند و با افزودن موم به فیلم‌های نشاسته، میزان حلالیت در اسید نیز کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). علاوه بر این، فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم دارای کمترین حلالیت در اسید (۱۵/۸۲٪) را در بین فیلم‌های حاوی موم داشت ( $p < 0.05$ ). مطابق با نتایج حلالیت فیلم‌ها در محیط اسیدی به مراتب بالاتر از محیط آبی بود که به دلیل گروه‌های پروتون در محیط اسیدی است. پرز-ورگارا و همکاران (۲۰۲۰) دلیل حلالیت فیلم‌های نشاسته کاساوا حاوی موم زنبورعسل در اسید را به ساختار موم عنوان کردند. موم زنبورعسل متشکل از الکل‌های چرب  $C_{24}$ - $C_{36}$  کربنه و اسیدهای چرب است که مولکول‌های استری بلند را می‌سازد. این ساختار در شرایط اسیدی هیدرولیز می‌شود و الکل‌های چرب تولید شده منجر به افزایش حلالیت فیلم در اسید می‌شود (۳۰). حلالیت فیلم‌ها در شرایط اسیدی از جهت قابل هضم بودن فیلم‌های خوراکی حائز اهمیت است (۱۸).

### ۳-۵- اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبت به بخار آب (WVP)



شکل ۵- مقایسه میانگین نفوذپذیری نسبت به بخار آب در تیمارهای مورد بررسی.

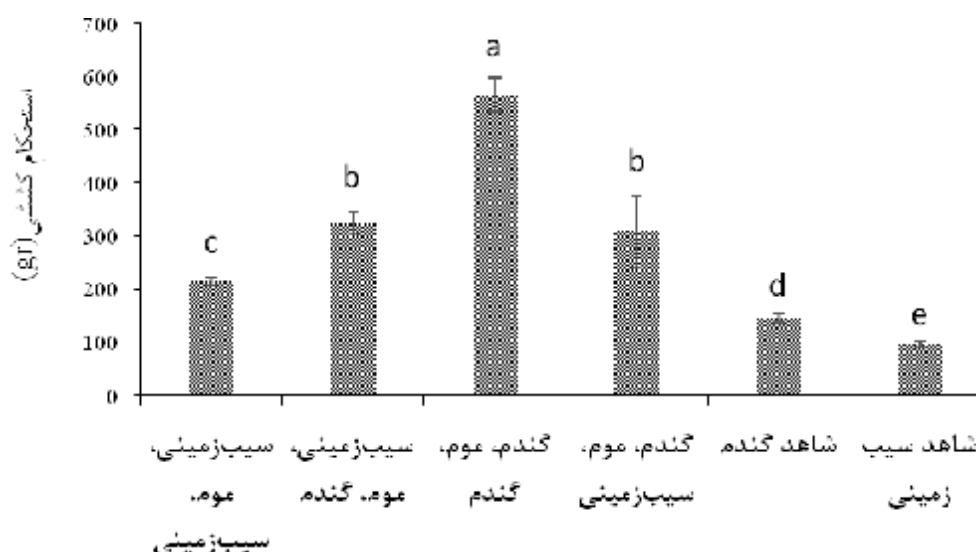
\* میانگین‌هایی که حروف مشابه ندارند، از نظر آزمون دانکن (در سطح احتمال پنج درصد) اختلاف معنی‌داری با یکدیگر دارند.

شکل (۵) مقایسه میانگین نفوذپذیری نسبت به بخار آب در تیمارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان نفوذپذیری فیلم‌های شاهد در مقایسه با فیلم‌های حاوی موم میزان نفوذپذیری بیشتری نسبت به بخار آب داشتند. از طرفی فیلم شاهد سیب‌زمینی ( $4/96 \pm 0/74 \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ ) در مقایسه با شاهد گندم ( $4/11 \pm 0/18 \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ ) نفوذپذیری بیشتری نسبت به بخار آب داشت که علت آن می‌تواند ناشی از خاصیت آبدوستی بیشتر در نشاسته سیب‌زمینی و همچنین ضخامت بیشتر فیلم نشاسته گندم باشد.

کمترین میزان نفوذپذیری به بخار آب در نمونه فیلم حاوی موم در فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم ( $0/07 \pm \text{kg/m}^2\text{sPa}$ ) (۰/۷۱) مشاهده شد و بیشترین میزان متعلق به نمونه‌های نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته سیب‌زمینی ( $3/06 \pm 0/09 \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ ) بود. با افزایش لایه سیب‌زمینی میزان نفوذ بخار به فیلم بیشتر شد. تیمارهایی نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته گندم و نشاسته گندم-موم-نشاسته سیب‌زمینی، نفوذپذیری مشابهی با یکدیگر نشان دادند. از آنجایی که وظیفه اصلی بسته بندی مواد غذایی اغلب جلوگیری یا حداقل کاهش انتقال رطوبت بین غذا و فضای اطراف است، WVP باید تا حد امکان پایین باشد (۲۸). نتایج برتوزی و همکاران (۲۰۰۷) نشان می‌دهد که خصوصیات نفوذپذیری و آب دوستی فیلم‌های نشاسته گندم به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های ذاتی گرانول است (۸).

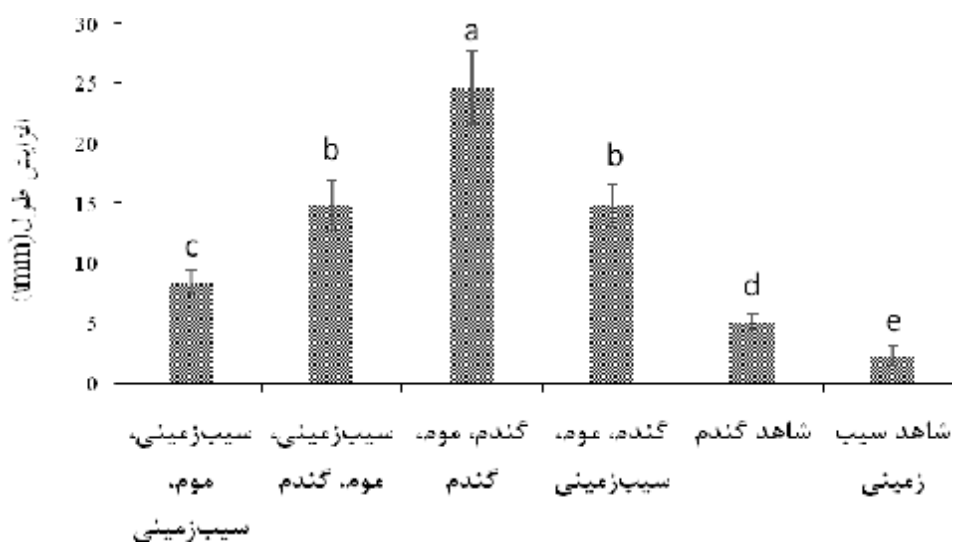
نتایج تحقیق حاضر مطابق با نتایج ورگارا و همکاران (۲۰۲۰) که تاثیر افزودن موم زنبورعسل و خاصیت نفوذپذیری به بخار آب در فیلم‌های نشاسته کاساوا بررسی کردند مطابقت داشت (۳۰).

### ۳-۶- اندازه‌گیری خواص مکانیکی فیلم



شکل ۶- استحکام کششی (Peak load) در تیمارهای مورد بررسی در آزمایش.

حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای مورد بررسی در آزمایش است.



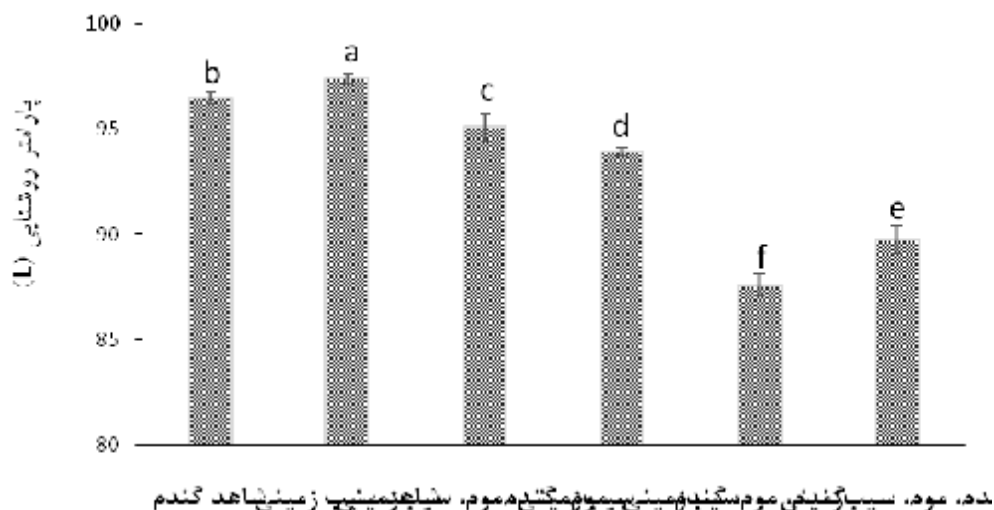
شکل ۷- تغییر طول در تیمارهای مورد بررسی در آزمایش.

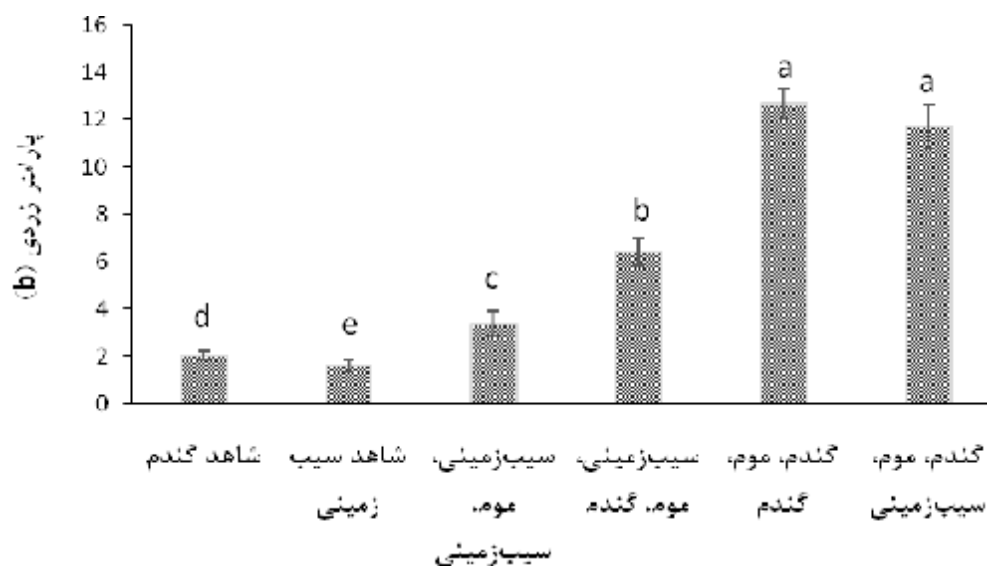
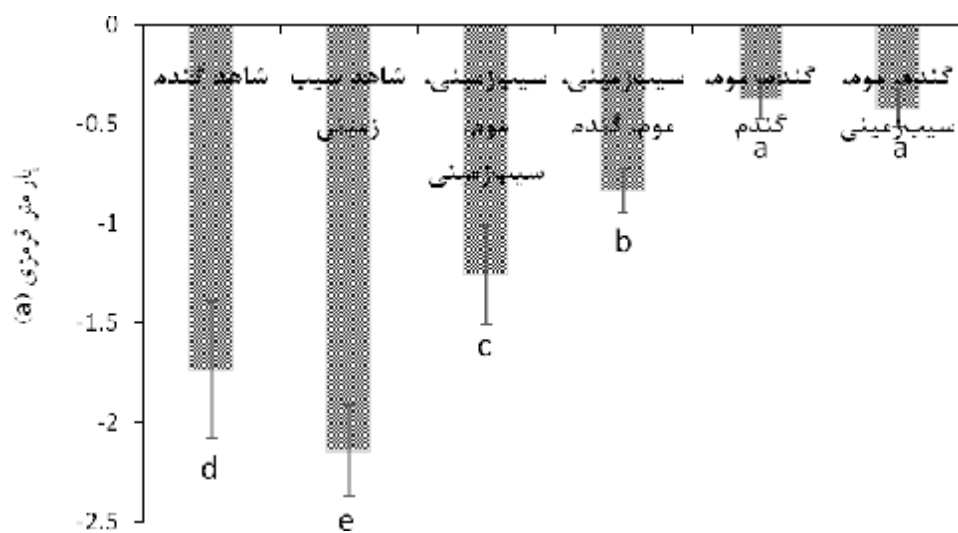
\*حروف مشابه نشان دهنده نبود اختلاف معنی دار بین تیمارهای مورد بررسی در آزمایش است.

خصوصیات مکانیکی از جمله خصوصیات است که تعامل بین پلیمرها تأثیر مستقیمی بر آن دارد. ضخامت فیلم تأثیر مستقیم بر دیگر پارامترهای اساسی فیلمها دارد. شکل (۶) و (۷) خصوصیات فیزیکی از جمله استحکام کششی و افزایش طول فیلمهای سیب زمینی-موم-سیب زمینی، گندم-موم-سیب زمینی، سیب زمینی-موم-گندم و گندم-موم-گندم را نشان می دهد. میزان استحکام کششی فیلمهای شاهد کمتر از فیلمهای حاوی موم بود. همچنین استحکام کششی فیلم شاهد گندم با میزان  $147/75 \pm 54/8$  Pa بیشتر از استحکام کششی فیلم شاهد سیب زمینی با مقدار  $(92/25 \pm 93/5$  Pa) بود. در بین تیمارهای حاوی موم فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم  $(566/00 \pm 73/30$  Pa) و فیلم نشاسته سیب زمینی-موم-نشاسته سیب زمینی  $(215/25 \pm 41/7$  Pa) به ترتیب بیشترین و کمترین استحکام کششی را داشتند. بین تیمارهای نشاسته سیب زمینی-موم-نشاسته گندم و نشاسته گندم-موم-نشاسته سیب زمینی اختلاف معنی داری مشاهده نشد ( $p < 0/05$ ). مطابق با گینزی و همکاران (۲۰۰۶) منابع مختلف و نسبتهای مختلف آمیلوز و آمیلوپکتین باعث بروز خصوصیات فیزیکی متفاوتی در فیلمها می شود (۲۰). مقاومت مکانیکی فیلمها بسیار به ضخامت آنها بستگی دارد. هر چه ضخامت فیلم بیشتر باشد استحکام کششی نیز بیشتر است (۳۱). آمیلوز فیلمهای قوی تری را نسبت به آمیلوپکتین تشکیل می دهد (۶). به عبارتی فیلمهایی که دارای آمیلوز کمتری باشند، استحکام کششی و سفتی کمتری دارند. علت این پدیده میتواند به ساختارهای کریستالی نشاستهها نیز مرتبط باشد. به این معنا که نشاستههایی که دارای آمیلوز بالایی هستند، فضای کریستالی بزرگتری دارند که باعث مقاومت مکانیکی بیشتری می شوند. این ساختارهای کریستالی در یک بستر آمورفی قرار گرفته اند و باعث بهبود ویژگیهای مکانیکی فیلم می شوند (۱۵). نتایج این پژوهش با نتایج دومن لویز و همکاران (۲۰۱۹)، لی و همکاران (۲۰۱۱)، کانو و همکاران (۲۰۱۴) و موسکات و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت داشت. همان طور که در شکل ۷ ملاحظه می شود میزان افزایش طول فیلمهای شاهد کمتر از فیلمهای حاوی موم بود. همچنین افزایش طول فیلم شاهد گندم بیشتر از افزایش طول فیلم شاهد سیب زمینی بود. در بین تیمارهای حاوی موم فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم و فیلم نشاسته سیب زمینی-موم-

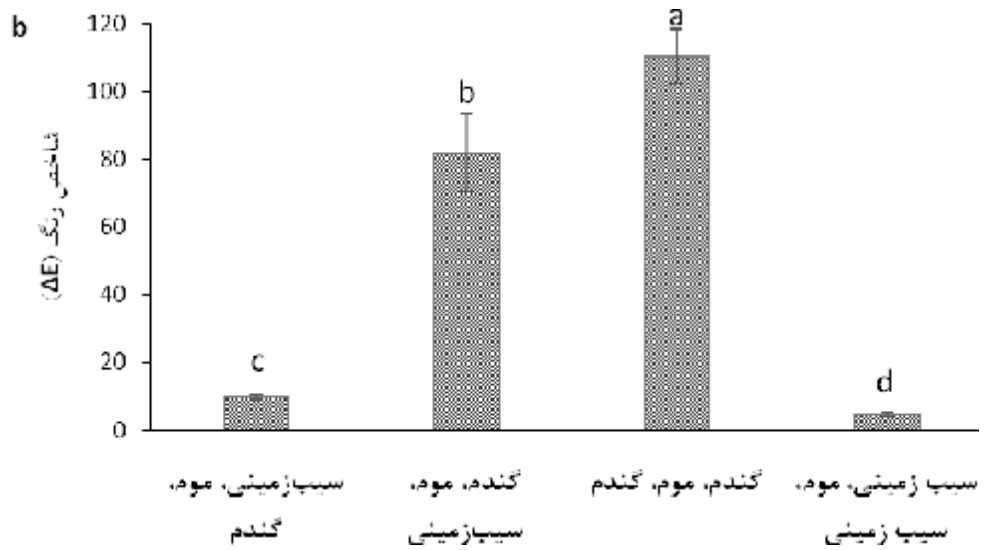
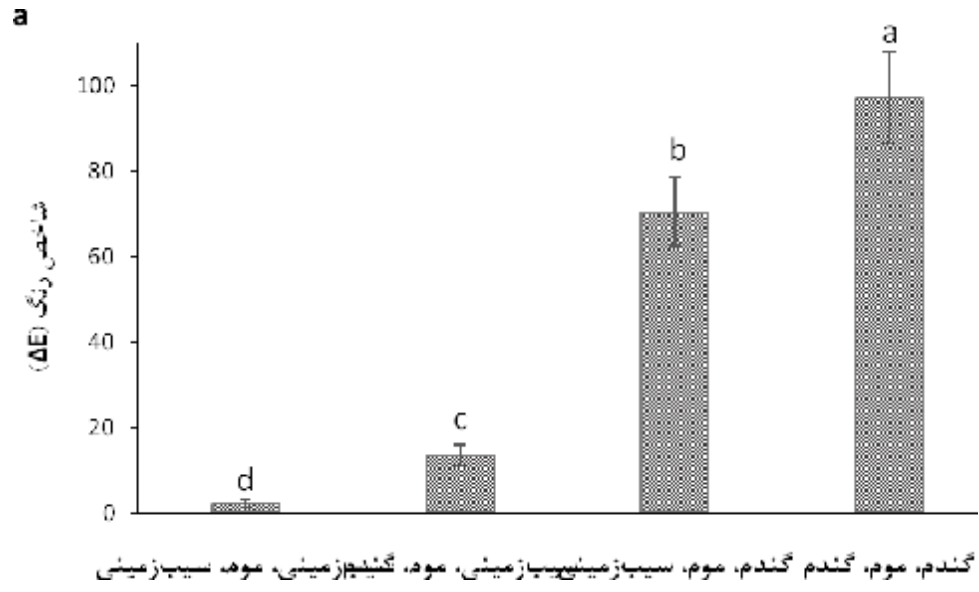
نشاسته سیب‌زمینی به ترتیب بیشترین و کمترین افزایش طول را داشتند. بین تیمارهای نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته گندم و نشاسته گندم-موم-نشاسته سیب‌زمینی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ( $p < 0.05$ ). پارامتر افزایش طول به میزان زیادی تحت تاثیر میزان ضخامت فیلم می‌باشد (۷). همانطور که ملاحظه می‌گردد، فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم که بیشترین ضخامت را دارا بود، بیشترین میزان افزایش طول را به خود اختصاص داد و فیلم شاهد سیب‌زمینی که کمترین مقدار ضخامت را داشت، کمترین افزایش طول را داشت. باسیاک و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش کردند که فیلم‌های حاوی نشاسته گندم قابلیت تغییرپذیری بیشتری نسبت به فیلم‌های حاوی نشاسته سیب‌زمینی بودند. این محققین افزایش طول نمونه‌ها را به میزان آمیلوز/آمیلوپکتین نشاسته نسبت دادند. فابرا و همکاران (۲۰۱۰) که بررسی‌های آنها در زمینه خواص فیزیکی فیلم‌ها از جمله استحکام کششی و مدول یانگ انجام شده است. نشان داده است که این خواص به منبع نشاسته مورد استفاده وابسته است. نتایج این محققین با تحقیق حاضر مطابقت دارد (۱۴). همچنین نتایج تحقیقات دای و همکاران (۲۰۱۹) که اثرات نشاسته از منابع مختلف گیاهی و روشهای اصلاح بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فیلم‌های خوراکی مبتنی بر نشاسته را بررسی کردند با نتایج این تحقیق همخوانی داشت (۱۱).

### ۳-۷- اندازه‌گیری رنگ فیلم



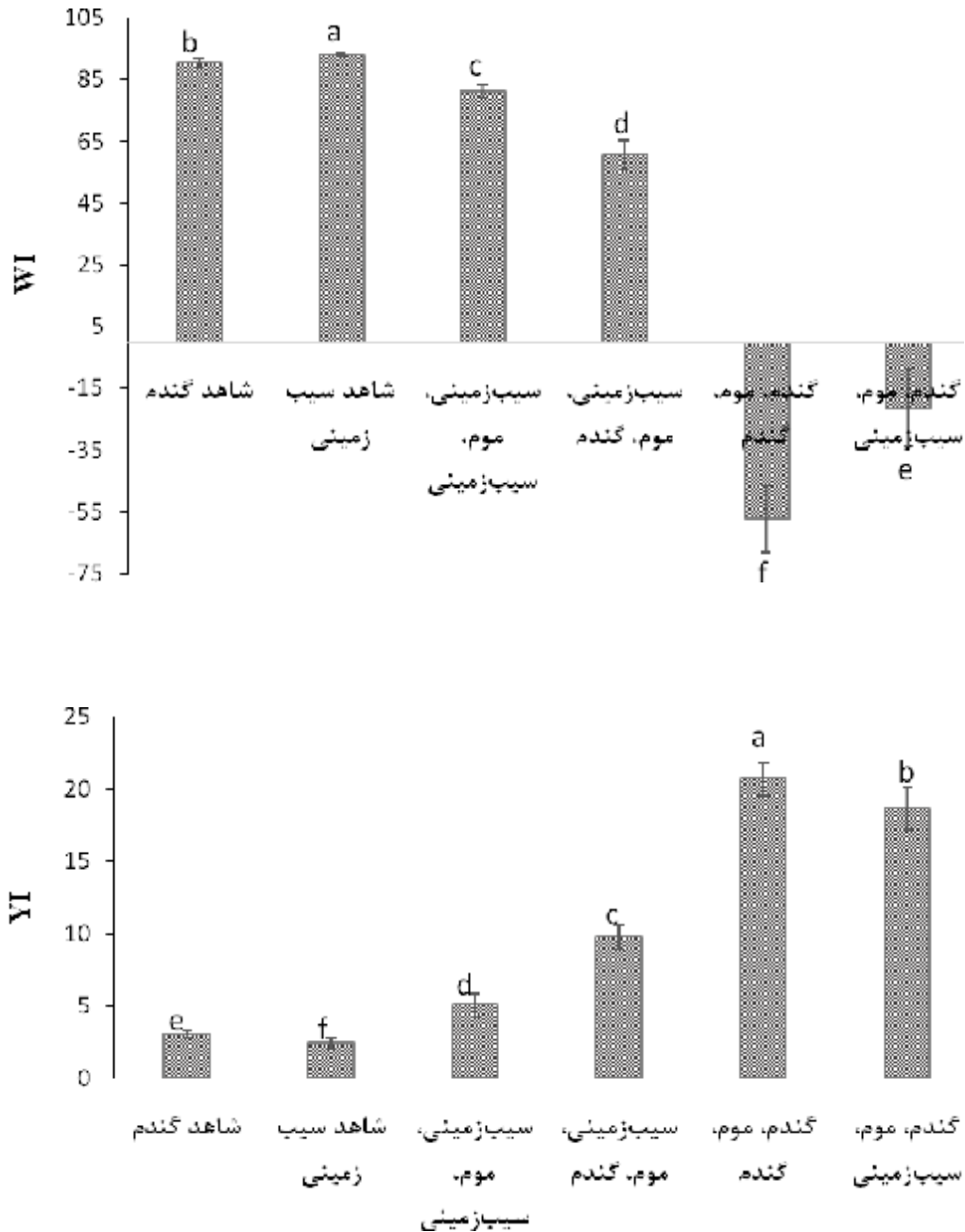


شکل ۸- پارامترهای رنگی در تیمارهای مختلف.



شکل ۹- شاخص رنگ (ΔE) تیمارهای مختلف در مقایسه با فیلم شاهد گندم (a) و شاهد سیب زمینی (b).





شکل ۱۰- شاخص سفیدی (WI) و شاخص زردی (YI) تیمارهای مختلف.

پارامترهای رنگی (روشنایی، قرمزی و زردی) در تیمارهای مختلف گندم در شکل ۸ و شاخص رنگ ( $\Delta E$ ) نمونه‌های مختلف در مقایسه با شاهد گندم و شاهد سیب زمینی در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، افزودن موم زنبور عسل بر شاخص روشنایی اثر معنی‌دار داشت و فیلم‌های حاوی موم در مقایسه با فیلم‌های شاهد گندم ( $L = 96/48$ ) و شاهد سیب زمینی ( $L = 97/40$ ) دارای شاخص روشنایی کمتری بودند ( $p < 0/05$ ). مقایسه پارامتر روشنایی در فیلم‌های شاهد نشان داد فیلم نشاسته سیب زمینی پارامتر روشنایی بیشتری نسبت به نشاسته گندم داشت که علت آن مقادیر بالاتر لیپید در نشاسته گندم می‌باشد. همچنین

پارامتر روشنایی به ضخامت فیلم نیز بستگی دارد و هر چه ضخامت بیشتر باشد، فیلم مات تر و پارامتر روشنایی کمتری دارد (۷) که نتایج این پارامتر با نتایج ضخامت کاملاً مطابقت داشت. مقایسه پارامتر روشنایی در فیلم‌های حاوی موم، تحت تاثیر نوع نشاسته و ترتیب لایه‌ها بود. به این شکل که فیلم دارای دو لایه سیب‌زمینی ( $L=95/08$ ) روشن تر از سایر فیلم‌های سه لایه بود و فیلم حاوی دو لایه گندم ( $L=87/62$ ) کمترین پارامتر روشنایی را در بین تیمارها داشت. فیلم سه لایه‌ی نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته گندم، روشنایی بیشتری نسبت به فیلم سه لایه نشاسته گندم-موم-سیب‌زمینی بود که به دلیل قرار گرفتن فیلم نشاسته سیب‌زمینی در سطح می‌باشد.

همچنین مطابق با نتایج، پارامتر زردی (b) در نمونه‌های شاهد گندم و سیب‌زمینی به ترتیب  $2/04$  و  $1/63$  بود که با اختلاف معنی‌داری نسبت به شاخص زردی در فیلم‌های حاوی موم زنبور عسل کمتر بود ( $p < 0/05$ ) که به دلیل وجود موم زنبور عسل در فیلم‌های سه لایه می‌باشد. فیلم شاهد نشاسته گندم با اختلاف معنی‌داری پارامتر زردی بیشتری نسبت به نشاسته سیب‌زمینی داشت که ناشی از وجود املاح و محتوای لیپیدی می‌باشد ( $p < 0/05$ ). مطابق با نتایج فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم بیشترین پارامتر زردی در مقایسه با سایر تیمارها داشت که ناشی از وجود دو لایه نشاسته گندم می‌باشد و فیلم نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته سیب‌زمینی زردی کمتری نسبت به سه تیمار دیگر داشت ( $p < 0/05$ ).

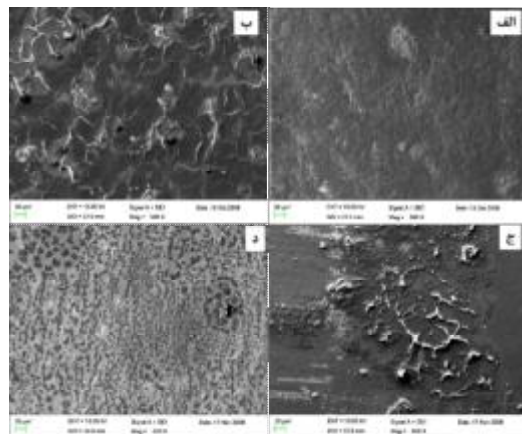
بررسی پارامتر قرمزی نشان داد که فیلم‌های حاوی موم، پارامتر قرمزی بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند. همچنین نشاسته گندم ( $a = -1/73$ ) دارای پارامتر قرمزی بیشتری نسبت به نشاسته سیب‌زمینی ( $a = -2/14$ ) بود زیرا فیلم‌های حاصل از نشاسته‌های دارای آمیلوز بیشتر دارای پارامتر قرمزی بیشتری است (۲۳). از این رو فیلم نشاسته گندم-موم-نشاسته گندم ( $a = -0/37$ ) بیشترین پارامتر قرمزی و فیلم نشاسته سیب‌زمینی-موم-نشاسته سیب‌زمینی ( $a = -1/26$ ) کمترین میزان پارامتر قرمزی را در بین تیمارها داشت.

$\Delta E$  نشان دهنده کل تفاوت رنگ در نمونه‌ها می‌باشد. هر چقدر  $\Delta E$  بزرگتر باشد، رنگ فیلم بیشتر است (۱۹). شاخص  $\Delta E$  فیلم‌های نشاسته سیب‌زمینی-موم-سیب‌زمینی، سیب‌زمینی-موم-گندم و گندم-موم-سیب‌زمینی براساس نمونه شاهد نشاسته گندم و نمونه‌های سیب‌زمینی-موم-گندم، گندم-موم-سیب‌زمینی و گندم-موم-گندم در مقایسه با شاهد سیب‌زمینی محاسبه گردید. مطابق با نتایج، فیلم گندم-موم-گندم در مقایسه با فیلم‌های شاهد بیشترین میزان شاخص  $\Delta E$  را داشت. علاوه بر این، پارامترهای رنگی به منبع نشاسته (نسبت آمیلوز/آمیلوپکتین، اندازه و شکل گرانول‌های نشاسته) و ضخامت بستگی دارد و هر چه میزان ضخامت بیشتر باشد، فیلم مات تر هست (۷). مطابق با نتایج بیشترین مقدار شاخص  $\Delta E$  در نمونه نشاسته گندم-موم-گندم مشاهده شد که نشان دهنده تاثیر موم و نوع نشاسته بر شدت رنگ فیلم‌های سه لایه می‌باشد. همچنین مطابق با شکل ۱۰ و بررسی شاخص سفیدی (WI) و شاخص زردی (YI) روند مشابهی را نشان داد به گونه این که فیلم گندم-موم-گندم کمترین شاخص سفید و بیشترین شاخص زردی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشت که با نتایج پارامترهای رنگی روشنایی (L) و زردی (b) مطابقت داشت.

نتایج تحقیق حاضر با نتایج مهدیان و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت داشت. در مطالعه‌ای باسیاک و همکاران (۲۰۱۷) تاثیر نوع نشاسته را بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فیلم حاصل از آنها مورد بررسی قرار دادند. آنها نتایج مشابهی در مورد پارامترهای رنگی فیلم نشاسته سیب‌زمینی و فیلم نشاسته گندم گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت. همچنین دای و همکاران (۲۰۱۹)

تأثیر منبع نشاسته را بر رنگ فیلم بررسی کردند. نتایج آن نشان داد که فیلم‌های تهیه شده از نشاسته ذرت مومی، نشاسته کاساوا و نشاسته گندم رنگ بیشتری در مقایسه با فیلم تهیه شده با نشاسته سیب زمینی و ذرت داشتند (۱۱).

### ۳-۸- اندازه‌گیری خصوصیات سطحی فیلم (SEM)



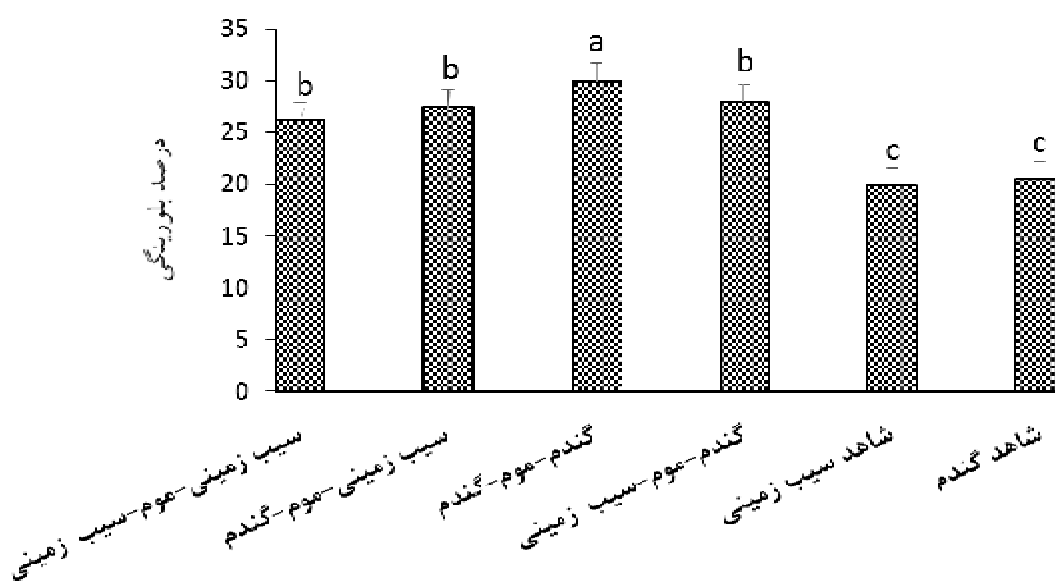
شکل ۱۱- خصوصیات مورفولوژیکی فیلم‌های حاصل از الف) نشاسته سیب‌زمینی-موم-سیب‌زمینی ب) سیب‌زمینی-موم-گندم ج) گندم-موم-گندم د) گندم-موم-سیب‌زمینی

در شکل ۱۱ خصوصیات مورفولوژیکی فیلم‌های نشاسته حاصل از تیمارهای گندم-موم-سیب‌زمینی، گندم-موم-گندم، سیب‌زمینی-موم-سیب‌زمینی، سیب‌زمینی-موم-گندم در نسبت‌های مختلف را نشان می‌دهد. تصاویر در بزرگنمایی‌های متفاوت عکس‌برداری گردید تا بهترین‌ها انتخاب گردد. تصاویر تمام فیلم‌های نشاسته، نشان دهنده هموزن بودن ساختار داخلی و بدون حفره فیلم است که به علت فرآیند خوب ژلاتینه شدن نشاسته و تخریب گرانول‌های نشاسته است. همچنین یکنواختی سطح فیلم‌ها نشان دهنده‌ی تمامیت و یکنواختی ساختاری بستر و در نتیجه افزایش استحکام کششی این فیلم‌ها می‌شود. همان‌طور که در تصاویر قابل مشاهده است در برخی از نقاط، ذرات موم در بستر نشاسته پراکنده شده است. علاوه بر این، رشته‌های زیادی در بستر فیلم مشاهده شد (شکل ۱۰، ب. ج.) که عمدتاً آمیلوزهای استخراج شده از گرانول‌های نشاسته در حین فرآیند ژلاتینه شدن می‌باشد که این نتایج با مشاهدات هان و همکاران (۲۰۰۶) که بر روی خصوصیات فیزیکی فیلم‌های نشاسته نخود فرنگی حاوی موم زنبورعسل مطابقت داشت (۲۱). در مورد اثر منبع نشاسته در خصوصیات فیلم با توجه به شکل (۱۰) می‌توان متوجه شد که فیلم‌های حاوی نشاسته سیب‌زمینی سطح یکنواخت‌تری دارند. خصوصیات مورفولوژیکی فیلم تصویر روشن‌تری از سطح فیلم، یکنواخت بودن، چروکیدگی سطح فیلم و یا زبری آن را نشان می‌دهد.

محققان بیان کردند منبع نشاسته و همچنین نوع گرانول‌ها مهم‌ترین عامل در شکل سطح فیلم است به علاوه عامل وجود حفرات و ترک‌های سطحی در مرحله خشک شدن را مرتبط با میزان آبی که با نشاسته‌ها در تعامل است می‌دانند. در توافق با نتایج حاصله تان و همکاران (۲۰۱۲) سازگاری پلیمرها در فیلم‌های کامپوزیت را عامل یکنواختی فیلم‌ها می‌دانند که منجر به ساخت فیلم‌هایی

سطح می‌گردد (۳۳). چامبی و همکاران (۲۰۰۶) وجود ترک‌هایی در فیلم گزارش کرده‌اند که احتمالاً وجود آنها را در نتیجه فرآیند خشک شدن توصیف کرده‌اند (۱۰). از جهت فهم بهتر تأثیر خصوصیات مورفولوژیکی و تفاوت بین تیمارها می‌توان به نتایج مایلارین و همکاران (۲۰۰۲) اشاره کرد، آنها با مقایسه فیلم نشاسته ذرت، آلایفا و کاساوا نشان داده‌اند که نشاسته ذرت فیلمی با ذرات همگن‌تر و فیلم‌های نشاسته ذرت متراکم‌تر هستند. برتوزی و همکاران (۲۰۰۷) منبع نشاسته را مهم‌ترین عامل در شکل سطح فیلم همچنین نوع گرانول‌ها دانستند همچنین آن‌ها علت ایجاد ترک‌های سطحی را در سطح فیلم میزان آبی که با نشاسته‌ها در تعامل است در مرحله خشک‌شدن می‌دانند (۸).

### ۳-۹- آزمون XRD



شکل ۱۲- درصد کریستالی فیلم‌های نشاسته در تیمارهای مورد بررسی.

حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای مورد بررسی در آزمایش است

ساختار کریستالی فیلم‌های نشاسته با آزمون XRD بررسی می‌شود. شکل ۱۲ نتایج پراکش اشعه ایکس در نمونه‌های مختلف فیلم‌های نشاسته را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، فیلم‌های سه لایه دارای نتایج XRD بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند ( $p < 0.05$ ). همچنین اختلاف معنی‌داری بین نتایج XRD در نمونه‌های شاهد مشاهده نشد. مقایسه نتایج XRD در فیلم‌های سه لایه نشان داد که فیلم‌های حاوی نشاسته گندم دارای XRD بالاتری نسبت به فیلم‌های نشاسته سیب‌زمینی داشتند ( $p < 0.05$ ) به طوری که فیلم گندم-موم-گندم بیشترین میزان XRD و فیلم سیب‌زمینی-موم-سیب‌زمینی کمترین میزان XRD را داشتند ( $p < 0.05$ ). بین نمونه‌های سیب‌زمینی-موم-گندم و گندم-موم-سیب‌زمینی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. به طور کلی، تفاوت در درجه کریستالی بین انواع نشاسته می‌تواند ناشی از اندازه کریستال، مقدار مناطق کریستالی (تحت تأثیر میزان آمیلوپکتین و طول زنجیره آمیلوپکتین)، جهت هلیکس‌های دوگانه و کریستال‌های درون‌های هلیکس‌های دوگانه می‌باشد. بنابراین فیلم‌های

آمیلوپکتین دارای ساختار آمورف هستند (۳۴). ریندلاو-وستلینگ و همکاران در سال ۲۰۰۲، بلورینگی فیلم‌های ساخته شده از آمیلوز و آمیلوپکتین را بررسی کردند. این محققین گزارش کردند که بلورینگی فیلم‌های حاوی آمیلوز ۳۳٪ بود، در صورتی که ساختار فیلم حاصل از آمیلوپکتین بصورت آمورف (بلورینگی صفر درصد) بود. همچنین، مقدار درصد بلورینگی فیلم حاصل از مخلوط آمیلوز و آمیلوپکتین بین درصد بلورینگی فیلم‌های خالص حاصل از آمیلوز و آمیلوپکتین بود. همچنین فیلم حاصل از آمیلوز به علت رتروگرید شدن در طی فرایند آماده‌سازی فیلم کمتر بود در نتیجه راحت‌تر کریستالی شدند. فیلم حاصل از آمیلوپکتین با توجه به ساختار مولکولی بسیار شبیه آمیلوپکتین در سیب‌زمینی بومی بود. با توجه به اینکه نشاسته گندم دارای محتوای آمیلوز بالاتری نسبت به نشاسته سیب‌زمینی است، بنابراین نتایج این محققان با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت. علاوه بر این، اختلاف مشاهده شده در بلورینگی فیلم‌های حاوی نشاسته گندم در برابر فیلم‌های حاوی نشاسته سیب‌زمینی می‌تواند به علت وزن مولکولی بالای نشاسته سیب‌زمینی نیز باشد که منجر به قابلیت کریستالیزاسیون کمتر ساختار پلیمری می‌شود زیرا اندازه بزرگتر مولکول مانع از نوآرایی زنجیره‌های نشاسته می‌شود. نتایج مشابهی توسط هورونگ و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شد. همچنین منواسترفسفات بیشتری در نشاسته سیب‌زمینی نسبت به نشاسته گندم وجود دارد (۳۲). این گروه‌های باردار به طور معنی‌داری منجر به نوآرایی کم نشاسته در هنگام تهیه فیلم نشاسته می‌شود. بنابراین، ساختار کریستالی فیلم نشاسته سیب‌زمینی را کاهش می‌دهد (۳۵).

#### ۴- نتیجه‌گیری

امروزه آلودگی‌های ناشی از بسته‌بندی‌های سنتزی و پلاستیک‌ها به محیط زیست، یکی از مشکلات بزرگی است که زندگی بشر را تهدید می‌کند. از این رو دانشمندان همیشه به دنبال راه حل برای حل این مشکل بزرگ بودند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از مواد زیست تخریب‌پذیر در بسته‌بندی‌های مواد غذایی و محصولات کشاورزی می‌تواند راه حل مناسبی برای رفع این مشکل باشد. فیلم‌های سنتزی به علت ماهیت زیست تخریب‌پذیری که دارند کامل بازیافت نمی‌شوند و یا بازیافت آن‌ها بسیار مشکل‌پرهزینه است و بنابر دلایلی که گفته شد فیلم‌های خوراکی راه حل مناسبی برای رفع این مشکل می‌باشند. فیلم‌های چندلایه از نظر آزمون‌های مورد بررسی، برتری چشم‌گیری نسبت به فیلم‌های تک لایه از خود نشان دادند همچنین اضافه کردن موم زنبورعسل به فیلم باعث افزایش ضخامت فیلم‌ها شد و میزان نفوذپذیری به بخار آب و رطوبت بسیار کمتر شد همانطور که در متن مقاله گفته شد، خواص مکانیکی فیلم‌هایی که دولایه نشاسته گندم داشتند بهتر از سایر فیلم‌ها بود. ترتیب لایه‌ها (سیب-موم-گندم یا گندم-موم-سیب) در بسیاری از پارامترها تفاوت معناداری ایجاد نکرد و در مجموع اگر جمع ویژگی‌ها را در نظر بگیریم فیلم نشاسته گندم در مقایسه با نشاسته سیب‌زمینی به علت ضخامت بیشتر و میزان جذب آب و رطوبت کمتر به نظر فیلم بهتری تولید می‌کند.

#### ۵- منابع

- ۱) دمان، ج. ۱۳۹۴. مبانی شیمی مواد غذایی. انتشارات آبیژ، تهران، صفحات ۳۲۸-۱.
- ۲) عسگری‌راد، ح. پورمراد، ف. و اکبری، خ. ۱۳۸۳. تهیه و استاندارد نمودن موم زنبور عسل دارویی. مجله دانشگاه علوم پزشکی بابل، جلد ۶، شماره ۴، ۱۲-۱۶.
- ۳) مرادی، ص. ۱۳۸۷. طراحی و ساخت قالب مخروطی چرخان برای تولید فیلم چندلایه. پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت

۴) مهدیان، ر. مولوی، ه. و حجت الاسلامی، م. ۱۳۹۹. بررسی خصوصیات فیلم خوراکی بر پایه نشاسته سیب‌زمینی و

گندم/ژلاتین. نشریه نوآوری در علوم و فناوری غذایی. شماره ۳، ۱۰۵-۱۱۴.

- 5) Ballesteros-Mártinez, L. Pérez-Cervera, C. and Andrade-Pizarro, R. 2020. Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. *NFS Journal*, 20: 1-9.
- 6) Bangar, S.P. Purewal, S.S. Trif, M. Maqsood, S. Kumar, M. Manjunatha, V. and Rusu, A.V. 2021. Functionality and applicability of starch-based films: An eco-friendly approach. *Foods*, 10(9): 1-24.
- 7) Basiak, E. Lenart, A. and Debeaufort, F. 2017. Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98: 348-356.
- 8) Bertuzzi, M. Vidaurre, E.C. Armada, M. and Gottifredi, J. 2007. Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of food engineering*, 80(3): 72-80.
- 9) Cao, X. Chen, Y. Chang, P. Stumborg, M. and Huneault, M. 2008. Green composites reinforced with hemp nanocrystals in plasticized starch. *Journal of Applied Polymer Science*, 109: 3804-3810.
- 10) Chambi, H. and Grosso, C. 2006. Edible films produced with gelatin and casein cross-linked with transglutaminase. *Food research international*: 39(4): 458-464.
- 11) Dai, L. Zhang, J. and Cheng, F. 2019. Effects of starches from different botanical sources and modification methods on physicochemical properties of starch-based edible films. *International journal of biological macromolecules*, 132: 897-905.
- 12) Diyana, Z.N. Jumaidin, R. Selamat, M.Z. and Suan, M.S.N. 2021. Thermoplastic starch/beeswax blend: Characterization on thermal mechanical and moisture absorption properties. *International journal of biological macromolecules*, 190: 224-232.
- 13) Domene-López, D. García-Quesada, J.C. Martín-Gullon, I. and Montalbán, M.G. 2019. Influence of starch composition and molecular weight on physicochemical properties of biodegradable films. *Polymers*, 11(7): 1-13.
- 14) Fabra, M.J. Talens, P. and Chiralt, A. 2010. Influence of calcium on tensile, optical and water vapor permeability properties of sodium caseinate edible films. *Journal of Food Engineering*: 96(3): 56-64.
- 15) Fakhouri, F.M. Martelli, S.M. Caon, T. Velasco J.I.L. and Mei, H.I. 2015. Edible films and coatings based on starch/gelatin: Film properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crimson grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 109: 57-64.
- 16) Garcia, N.L. Fama, L. Dufresne, A. Aranguren, M. and Goyanes, S. 2009. A comparison between the physico-chemical properties of tuber and cereal starches. *Food Research International*, 42(8):976-982.
- 17) Ghanbarzadeha, B. Almasia, H.A. and Entezamib, A. 2011. Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: Effect of citric acid and carboxymethyl cellulose. *Industrial Crops and Products*: 229-235.
- 18) Gontard, N. Guilbert, S. and Cuq, J. 1992. Edible wheat gluten films: influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 57(1): 190-195.
- 19) Goudarzi, V. Shahabi-Ghahfarrokha, I. and Babaei-Qazvini, A. 2018. Preparation of ecofriendly UV-protective food packaging material by starch/TiO<sub>2</sub> bio-nanocomposite: characterization. *International*

- Journal of Biological Macromolecules*, 95: 306-313.
- 20) Guinea, L.S.D.R. AL, A.L. Corradini, E. Mattoso, L.H.C. Teixeira, E.D.M. and Curvelo, A.A.S. 2006. Kinetics of thermal degradation applied to starches from different botanical origins by non- isothermal procedures. *Thermochimica Acta*: 47(2): 60-69.
  - 21) Han, J. Seo, G. Park, I. Kim, G. and Lee, D. 2006. Physical and Mechanical Properties of Pea Starch Edible Films Containing Beeswax Emulsions. *Journal of food science*, 71: 290-296.
  - 22) Hornung, P.S. Ávila, S. Masisi, K. Malunga, L.N. Lazzarotto, M. Schnitzler, E. Ribani, R.H. and Beta, T. 2018. Green development of biodegradable films based on native yam (*Dioscoreaceae*) starch mixtures. *Starch-Starke*, 70: 1700234.
  - 23) Hromiš, N.M.V.L. Lazić, S.L. Markov, Ž.G. Vaštag, S.Z. Popović, D.Z. Šuput, N.R. and Džinić, A.S. 2015. Optimization of chitosan biofilm properties by addition of caraway essential oil and beeswax. *Journal of Food Engineering*, 158: 86-93.
  - 24) Klangmuang, P. and Sothornvit, R. 2016. Combination of beeswax and nanoclay on barriers, sorption isotherm and mechanical properties of hydroxypropyl methylcellulose-based composite films. *Food science and Technology*, 65: 222-227.
  - 25) Maizura, M. Fazilah, A. Norziah, M.H. and karim, A.A. 2007. Antibacterial activity and mechanical properties of partially hydrolyzed sago starch–alginate edible film containing lemongrass oil. *Food Chemistry and Toxicology*, 1-17.
  - 26) Myllärinen, P. Buleon, A. Lahtinen, R. and Forssell, P. 2002. The crystallinity of amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymers*, 48(1): 41-48.
  - 27) Nordin, N.S. Othman, H. Rashid, S.A. and Basha, R.K. 2020. Effects of glycerol and thymol on physical, mechanical, and thermal properties of corn starch films. *Food Hydrocolloids*, 106: 105884.
  - 28) Ochoa, T.A.B. Almendárez, E.G. Reyes, A.A.D. Pastrana, M.R. López, G.F. Belloso, G.O. and Regalado-González, M.C. 2017. Design and characterization of corn starch edible films including beeswax and natural antimicrobials. *Food and bioprocess technology*, 10(1): 103-114.
  - 29) Ogur, S. 2015. The physicochemical properties of edible protein films. *Italian Journal of Food Science*, 27(1): 64-74.
  - 30) Pérez-Vergara, L.D. Cifuentes, M.T. Franco, A.P. Pérez-Cervera, C.E. and Andrade-Pizarro, R.D. 2020. Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis. *NFS Journal*, 21: 39-49.
  - 31) Pushpadass, H.A. Kumar, A.D. Jackson, S.R. Wehling, L.J. Dumais, J. and Hanna, M.A. 2009. Macromolecular changes in extruded starch-films plasticized with glycerol, water and stearic acid. *Starch-Stärke*, 5(61): 266-256.
  - 32) Siracusa, V. Rocculi, P. Romani, S. and Dalla Rosa, M. 2008. Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12): 634-643.
  - 33) Tuhin, M.O. Rahman, N. Haque, M. and Khan, R.A. 2012. Modification of mechanical and thermal property of chitosan - starch blend films. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(10): 59-68.
  - 34) Yang, L. and Paulson, A. 2000. Effects of lipids on mechanical and moisture barrier properties of edible gellan film. *Food Research International*, 33: 571-578.
  - 35) Zhang, L. Chen, F.A.H. Yang, H. Sun, X. 2008. Physicochemical properties, firmness, and

nanostructures of sodium carbonate-soluble pectin of 2 Chinese cherry cultivars at 2 ripening stages.  
*Journal of Food Science*, 73: 17-22.

### **As study on multilayer film properties composed of starch and beeswax**

Mehran Khalili Dehkordi<sup>1</sup>, Hooman Molavi<sup>2\*</sup>

1- MSc graduated, Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

2- Assistant professor, Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

\* Corresponding Author: [hmolavi2010@yahoo.com](mailto:hmolavi2010@yahoo.com)

#### **Abstract**

Starch is one of the most abundant carbohydrate biopolymers, which produces excellent films. However, its low resistance to water vapor and weak mechanical properties are the main problems of this polymer. One of the promising methods to improve the performance of these films is the production of multi-layer films, which compensates for some of the weaknesses of biopolymers. Beeswax with high hydrophobic properties is the best fat to improve the moisture barrier properties of films. In this research, multi-layered starch / beeswax films were produced by molding method and its properties including water vapor permeability, water solubility, moisture absorption percentage, mechanical properties, as well as external characteristics were studied and compared with single-layer biodegradable films. The results showed that the beeswax increased the thickness, tensile strength (more resistance to tearing), and crystallinity of the film. On the other hand, beeswax decreased the moisture, absorbed water, solubility (both in water and acid), and permeability to water vapor. The thickness of the double layer film made of wheat starch (wheat starch-wax- wheat starch) was greater than that of the double layer film made of potato starch (potato starch-wax-potato starch), while the order of the layers (potato starch-wax-wheat starch) or (wheat starch-wax-potato starch) did not make a significant difference. Multi-layer films, compared to single-layer films, absorbed less moisture and absorbed water, and the lower the moisture and water absorption, the better the properties of the film. In general, if we consider the overall results of the film characteristics, the wheat starch film was more suitable compared to the potato starch film due to its greater thickness and the lesser amount of water and moisture absorption.

**Keywords:** multilayer film, beeswax, starch.