

سیر تحول بسته‌بندی به روش اتمسفر اصلاح شده

وحید بهشاد^۱، ناصر صداقت^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۲- استاد گروه صنایع غذایی دانشگاه

فردوسی مشهد، مشهد، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1402.14.55.6.4

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱

چکیده

بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده (MAP) روشی است که در آن تغییر هدفمند ترکیب اتمسفر موجود در بسته‌بندی موجب افزایش ماندگاری محصول شده و به این صورت امکان حصول اطمینان از کیفیت ماده غذایی در طول مدت نگهداری فراهم می‌شود. مزایا و اهمیت استفاده از بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده برای بسیاری از محصولات، چه در سطح آزمایشگاهی و چه در شرایط تولید صنعتی نشان داده شده است. این مقاله، مروری بر سیر تحول بسته‌بندی MAP، از جمله MAP فعال، MAP غیرفعال، MAP منفذدار و همچنین تأثیر استفاده از ترکیب گازهای مختلف را ارائه می‌دهد. بسته‌بندی MAP فعال به صورت تغییر محتوای اتمسفر حین بسته‌بندی و بسته‌بندی غیر فعال به صورت تغییر ترکیب اتمسفر بسته‌بندی بر اثر تنفس و یا تبادل گاز میان بسته‌بندی و محیط است. MAP منفذدار یک رویکرد ترکیبی است که امکان تبادل گازها بین محصول و محیط را فراهم می‌کند. این مقاله همچنین اثرات مخلوط گازهای مختلف بر کیفیت و ایمنی محصول و همچنین اهمیت انتخاب مواد بسته‌بندی مناسب برای هر کاربرد را مورد بحث قرار داده و دیدگاهی ارزشمند در مورد گزینه‌های مختلف موجود برای بسته‌بندی MAP را ارائه می‌دهد تا امکان اتخاذ تصمیمات آگاهانه برای بهینه‌سازی کیفیت و ماندگاری محصولات فراهم شود.

کلیدواژه‌ها: بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده، بسته‌بندی منفذدار، بسته‌بندی MAP با اکسیژن بالا

۱- مقدمه

است [۲]. از آنجا که میزان تنفس در محصولات مختلف با یکدیگر بسیار متفاوت است، نفوذپذیری فیلم‌های پلاستیکی موجود باید با نیاز هر ماده غذایی مطابقت داشته باشد. جدول (۱)، محدوده نفوذپذیری O₂ و CO₂ فیلم‌های پلاستیکی و برخی از فیلم‌های زیستی را نشان می‌دهد. همچنین این امکان وجود دارد که در یک نوع پلیمر مشخص، بسته به عوامل ذاتی پلیمر، مانند وزن مولکولی، مواد افزودنی، شرایط ساخت، مورفولوژی و ... تغییرات زیادی در نفوذپذیری گاز و بخار وجود داشته باشد. مهمترین اصل در طراحی بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده در مورد محصولات تازه، کنترل نفوذ گاز O₂ و CO₂ به بسته‌بندی است. این تبادل باید به نحوی باشد که با مصرف اکسیژن و تولید دی‌اکسید کربن در فرایند تنفس محصول، اتمسفر بسته‌بندی تغییر کرده و به اتمسفر مناسب برای حفظ تازگی محصول نزدیک شود. این رابطه با فرض حالت ثابت می‌تواند به صورت دو معادله ساده به صورت ریاضی بیان شود:

$$WR_{O_2} = \frac{P_{O_2 A_f}(0.21P_a - P_{O_2})}{L_f} \quad (1)$$

$$WR_{CO_2} = \frac{P_{CO_2 A_f}(P_{CO_2} - 0.00)}{L_f}$$

اصلاح اتمسفر بسته‌بندی اولین بار به صورت ایجاد خلأ در بسته‌بندی ظهور کرده است که می‌تواند به عنوان یکی از اولین فرایندهای اصلاح بسته‌بندی در ابعاد صنعتی در نظر گرفته شود [۱]. پس از آن، بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده به صورت ایجاد تغییر اختصاصی و هدفمند در اتمسفر بسته‌بندی مطرح شده است؛ که بر اساس ویژگی‌های خاص ماده غذایی انجام می‌گردد که خود می‌تواند به دو صورت فعال و غیرفعال انجام شود. با توجه به اینکه ترکیب موجود در اتمسفر بسته‌بندی به میزان تنفس و عبور گاز از پلیمر بسته‌بندی بستگی دارد؛ اولین موضوعی که در زمینه بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده باید مورد بررسی قرار گیرد، نفوذپذیری فیلم‌ها و مواد بسته‌بندی مورد استفاده نسبت به O₂ و CO₂ است چرا که این موضوع شرطی اساسی برای دستیابی به اتمسفر مورد نظر در بسته‌بندی

* رایانامه نویسنده مسئول: sedaghat@um.ac.ir

می‌توان با استفاده از معادله (۱)، پلیمر مورد نظر برای غلظت اکسیژن و دی‌اکسید کربن برای محصولی مشخص را تعیین کرد. در شرایطی که بتوان میزان تنفس را ثابت در نظر گرفته یا تغییرات آن را به صورت تابعی خطی از غلظت اکسیژن بیان کرد؛ غلظت دی‌اکسید کربن با استفاده از مشتق‌گیری قابل دستیابی است و لیکن صورتی که تنفس، تابعی پیچیده از غلظت اکسیژن و دی‌اکسید کربن باشد، محاسبه عددی ضروری است [۳].

در این رابطه W وزن محصول بر حسب کیلوگرم و R_{O_2} و R_{CO_2} نرخ تنفس می‌باشد که به ترتیب مربوط به مصرف اکسیژن و تولید دی‌اکسید کربن است. P_a فشار اتمسفری هوا در حالت عادی ($101325 Pa$) و P_{O_2} و P_{CO_2} به ترتیب مربوط به فشار جزئی اکسیژن و دی‌اکسید کربن در داخل بسته است. همچنین، A_f نشان‌دهنده مساحت فیلم بسته‌بندی و L_f میزان ضخامت آن است. مساحت فیلم بسته (m^2) و L_f ضخامت لایه پلیمری است.

جدول (۱): میزان نفوذپذیری پلیمرهای بسته‌بندی مختلف نسبت به گازهای مختلف [۲۳]

نفوذپذیری ($mol\ m\ s^{-1}\ m^{-2}\ Pa^{-1}\ 10^{-6}$) در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد			فیلم پلیمر
H ₂ O	CO ₂	O ₂	
۲۴۹-۲۸۸	۳۲/۶-۶۱/۶	۷/۴-۹/۷	LDPE
۳۷-۲۷۳	۱۱/۰-۳۳/۱	۱/۸-۸/۳	HDPE
۹۷-۲۰۲	۹/۸-۲۴/۷	۲/۳-۴/۳	PP
۵۴-۱۴۰	۶/۱-۱۴/۶	۱/۷-۳/۵	OPP
۴۳۵-۴۶۵	۰/۲۴-۰/۵۶	۰/۰۵-۰/۱۰	PET
۱۱۶۰-۱۸۸۵۰	۱/۶-۲۰/۷	۰/۵-۲/۵	PLA
۱۰۸۰۰-۱۷۴۰۰	۰/۱۴-۲/۵۴	۰/۰۱-۰/۱۶۶	PHAs
۱۲۹۰-۳۳۷۰۰	۷/۳-۲۱/۸	۰/۶-۲/۱	فیلم‌های بر پایه نشاسته
		۰/۲	PBS

۲- تحولات بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده

۲-۱- بسته‌بندی MAP غیر فعال

بسته‌بندی MAP غیرفعال بدون ایجاد تغییر در ترکیب اولیه هوای موجود در بسته‌بندی و بر اساس تنفس یا تبادل گاز سرفضای بسته‌بندی و هوای محیط، ترکیب مورد نظر هوای بسته‌بندی را ایجاد می‌کند. به این صورت، اصلاح موثر اتمسفر بسته‌بندی تحت تاثیر نرخ تنفس و میزان نفوذپذیری بسته‌بندی نسبت به گازهای مختلف ایجاد می‌شود؛ که منجر به ایجاد یک ترکیب پایدار اتمسفر پس از گذشت مدتی نسبتاً طولانی می‌شود [۴]. پس از مدت زمان معین، ترکیب گاز در بسته‌بندی محصول تازه، به تعادل مشخصی بین نرخ تنفس و نفوذپذیری فیلم بسته‌بندی می‌رسد. در این حالت تعادل، مقدار کل دی‌اکسید کربن تولید شده و اکسیژن مصرف شده توسط تنفس، بسته به میزان نفوذپذیری پلیمر بسته‌بندی، و میزان ورود و خروج این گازها به بسته‌بندی، ترکیب گازی را ایجاد می‌نماید [۵]. بنابراین وضعیت تعادل گاز تحت تاثیر نرخ تنفس محصول، عوامل محیطی ذخیره سازی (مانند دما و رطوبت نسبی) و نفوذپذیری مواد بسته‌بندی قرار دارد [۶]. بسته‌بندی MAP غیرفعال می‌تواند به نحوی مؤثر ویژگی‌های کیفی و ماندگاری محصولات تنفس‌کننده مانند میوه و سبزی را در دمای ذخیره‌سازی کمتر نسبت به اقلام بسته‌بندی نشده

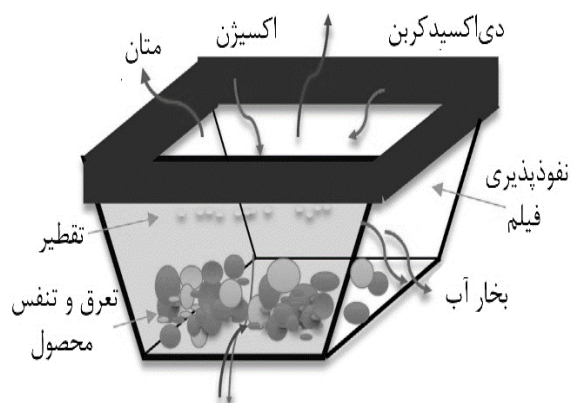
حفظ کند [۷]. همچنین این نوع بسته‌بندی می‌تواند بروز خشکی را کنترل کرده و رشد مخمر و باکتری‌های مزوفیل را کاهش دهد. به‌عنوان مثال نشان داده شده است که استفاده از بسته‌بندی MAP غیرفعال می‌تواند عمر ماندگاری طالبی تازه برش خورده را به مدت ۹ روز در دمای ۵ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد [۸].

با این حال، استفاده از MAP غیرفعال دارای معایبی است، که از جمله آن می‌توان به دوره گذار طولانی مدت مورد نیاز برای دستیابی به ترکیب مطلوب در داخل بسته و خطر نبود اکسیژن اشاره کرد [۹].

عوامل مختلفی بر نحوه عملکرد بسته‌بندی MAP اثرگذار هستند که می‌توان آن‌ها را به سه دسته تقسیم کرد:

- عوامل مرتبط با ماده غذایی: وزن ماده غذایی، چگالی ماده غذایی، نرخ تنفس، نرخ تعریق، مرحله رسیدگی، بار میکروبی اولیه
- عوامل بیرونی: نسبت و غلظت گازها، دمای نگهداری، رطوبت نسبی و مدت نگهداری.
- عوامل مرتبط با بسته‌بندی: حجم، ضخامت فیلم، سطح موثر فیلم برای انتقال گاز، نفوذپذیری نسبت به گاز و ایجاد منافذ (تعداد منافذ، شعاع منافذ، تعداد لوله‌ها)

کنند [۱۱]، استفاده از این جاذب‌ها می‌تواند به‌منظور کاهش فساد، به تأخیر انداختن پیری، و کاهش قهوه‌ای شدن و بروز کپک در محصولات تازه مؤثر باشد [۳]. از طرف دیگر، استفاده از جاذب‌های دی‌اکسید کربن می‌تواند از تجمع دی‌اکسید کربن در سطوح جلوگیری کند [۱۲]. جاذب‌های اتیلن نیز می‌توانند با حذف اتیلن از فضای داخلی بسته‌بندی، موجب تأخیر تنفس شده و فرایند رسیدن برخی میوه‌ها را به تأخیر بیاندازند. همچنین ثابت شده است که استفاده از این جاذب‌ها برای کیوی، موز، آووکادو، قارچ و خرمالو به صورت مؤثری منجر به افزایش زمان ماندگاری می‌شود [۱۳]. با این حال استفاده از این جاذب‌ها به دلیل عدم پذیرش مصرف‌کننده؛ مشکلاتی ایجاد کرده است و امکان استفاده از آن‌ها در مواد غذایی مایع به کل ممکن نیست چرا که تماس مستقیم مایع با این کیسه‌ها می‌تواند منجر به بروز مشکل شده و به محتویات ماده غذایی و کیسه جاذب آسیب وارد نماید. همچنین خطر بلعیده شدن این کیسه‌ها توسط کودکان یا مصرف اشتباهی آن‌ها به همراه غذا مشکلاتی هستند که در زمینه استفاده از این نوع جاذب‌ها باید به آن‌ها توجه شود [۱۴]. همچنین نگرانی‌هایی در مورد جاذب‌های اکسیژن بیان می‌شود چرا که امکان رشد بیش از حدارگانسیم‌های بیماری‌زای بی‌هوازی را فراهم می‌کنند [۱۴]. بنابراین، درک نحوه تغییرات ترکیبات گاز موجود در بسته‌بندی MAP و ویژگی‌های منحصربه‌فرد محصولات غذایی در تعیین روش مناسب از سیستم‌های بسته‌بندی فعال مهم است.



شکل (۱): تصویر شماتیک عوامل مؤثر بر بسته‌بندی MAP [۲۳]

۲-۲- بسته‌بندی MAP فعال

برخلاف بسته‌بندی MAP غیرفعال، در بسته‌بندی MAP فعال، ترکیب ابتدایی گاز موجود در بسته‌بندی با روش‌های مختلف به یک ترکیب هدف تغییر می‌کند تا به این صورت فرایند دستیابی به ترکیب گازی مورد نظر تسریع شده و از ایجاد ترکیبات گازی نامناسب جلوگیری شود [۵]. مطالعات متعددی مزایای استفاده از جایگزینی هوای معمولی با اتمسفر کم اکسیژن و دی‌اکسید کربن غنی شده را برای محصولات تنفس‌کننده، گزارش کرده‌اند [۱۰]. یکی از مهم‌ترین انواع کنترل‌کننده‌های اکسیژن در بسته‌بندی‌های MAP فعال، کیسه‌های کوچک حاوی ترکیباتی بر پایه آهن قابل اکسیداسیون هستند که می‌توانند با جذب اکسیژن از تغییر رنگ و بروز آسیب‌های ناشی از سرما جلوگیری

جدول (۲): مقایسه بسته‌بندی MAP فعال و غیرفعال [۲۳]

فعال	غیر فعال	تعریف
اصلاح ترکیب گازی موجود در بسته‌بندی با فلاشینگ محتوای گاز موجود در بسته‌بندی با ترکیب گازی مورد نظر	اصلاح ترکیب گاز درون بسته‌بندی با استفاده از تعادل میان تنفس محصول و نفوذپذیری ماده بسته‌بندی نسبت به گازها	
۱-۲ ساعت	۱-۲ روز الی ۱۰-۱۲ روز	زمان ایجاد تعادل
سیب برش خورده، سبزیجات فراوری نشده یا با فراوری حداقلی	قارچ، هویج، اسفناج، توت‌فرنگی	محصول مناسب
سرمایه‌گذاری اولیه برای تهیه ماشین‌آلات مخصوص و دستگاه‌های بسته‌بندی لازم است	بدون هزینه افزوده	هزینه
بله	خیر	الزام توضیح در برچسب

۲-۳-۲- نیتروژن

در برخی مطالعات، اثر استفاده از نیتروژن در غلظت‌های بسیار بالا یا مطلق (۱۰۰ درصد) در بسته‌بندی MAP مورد بررسی قرار گرفته است چرا که غلظت‌های بالای این گاز می‌تواند حفظ کیفیت محصول را به همراه داشته باشد [۱۸]. به‌عنوان مثال، نشان داده شده است که نگهداری میوه خرمالو در ترکیب گازی نیتروژن ۱۰۰ درصد موجب حفظ ویژگی‌های کیفی آن شده و مدت زمان نگهداری در دمای صفر درجه را ۹۰ روز افزایش می‌دهد [۲۱]. کلم تازه برش خورده و کاهو بسته‌بندی شده در شرایط اتمسفر اصلاح شده با غلظت نیتروژن ۱۰۰ درصد نیز می‌تواند پنج روز ماندگاری را به همراه داشته [۲۲]. به طور کلی، استفاده از نیتروژن به منظور جایگزین اکسیژن موجود در بسته‌بندی انجام می‌شود چرا که به این صورت فرایندهای اکسیداتیو کاهش یافته و با تاخیر رخ می‌دهند [۲۳].

۲-۳-۳- رطوبت بالا

فیلم‌های پلیمری معمولی که در بسته‌بندی محصولات تازه استفاده می‌شوند، اغلب نرخ انتقال بخار آب کمتری در مقایسه با نرخ تعرق محصولات تازه دارند. رطوبت نسبی بالا در بسته‌بندی به دلیل بخار آب آزاد شده توسط محصولات باغبانی، در صورت عدم مدیریت، می‌تواند منجر به تراکم آب بر روی مواد بسته‌بندی و محصولات شود. که در زمینه کیفیت و ایمنی محصول ایجاد خطر می‌نماید [۲۴] علاوه بر این، رطوبت بیش از حد در بسته‌ها می‌تواند تأثیر مضر بر محصولات پودری و آرد داشته باشد که می‌تواند منجر به کیک شدن محصول شود. تقطیر بخار آب روی سطح هر محصول و مواد بسته‌بندی که در دمای نقطه شبنم یا کمتر از آن باشد، رخ می‌دهد [۲۵].

تعادل بین رطوبت کم (زیر حد لازم) و رطوبت بیش از حد، یک چالش مهم در زمینه بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده است چرا که رطوبت کمتر از حد مجاز می‌تواند منجر به از دست دادن بیش از حد آب و چروک شدن محصولات تازه شود. از سوی دیگر، رطوبت بیش از حد، شرایط مساعدی برای تسریع رشد میکروبی و پوسیدگی فراهم می‌کند. از این رو، مدیریت مؤثر رطوبت در سیستم‌های MAP مواد غذایی ضروری است.

استراتژی‌های مختلفی برای مدیریت رطوبت بالا در داخل محصولات تازه بسته‌بندی شده در مقالات گزارش شده است. به‌عنوان مثال، ایجاد منافذ ریز به صورت معمول به منظور کنترل رطوبت در بسته‌بندی محصولات تازه و به منظور افزایش انتقال جرم مواد بسته‌بندی انجام می‌شود [۱۵]. استفاده از جاذب‌های رطوبت، رویکرد نوآورانه دیگری برای مدیریت رطوبت بالا ارائه می‌کند. جاذب‌ها را می‌توان به دو رویکرد کاربردی اصلی

۲-۳-۲- ترکیب اتمسفری جدید در بسته‌بندی MAP

۲-۳-۱- غلظت بالای اکسیژن یا دی‌اکسید کربن

شرط دستیابی به نتیجه موفقیت‌آمیز در استفاده از بسته‌بندی MAP، انتخاب ترکیب مناسب و بهینه گاز و فیلم بسته‌بندی مناسب است تا بتواند با نرخ مناسب نفوذپذیری نسبت به گاز و نرخ انتقال بخار آب، موجب متعادل شدن اتلاف رطوبت شده و از خشک شدن یا تجمع بخار آب در بسته‌بندی جلوگیری نماید. معمولاً به منظور افزایش نفوذپذیری بسته‌بندی نسبت به گازهای اکسیژن و دی‌اکسید کربن از فیلم‌های بسته‌بندی دارای منافذ (منافذ دارای ابعاد میکرو یا ماکرو) استفاده می‌شود. این نوع فیلم بسته‌بندی می‌تواند از تجمع دی‌اکسید کربن جلوگیری کرده و در عین حال غلظت بالاتری از اکسیژن را حفظ نماید [۱۵]. ایجاد منافذ در فیلم پلیمری مانند یک شمشیر دولبه عمل می‌کند چرا که وجود منافذ می‌تواند نفوذپذیری فیلم به اکسیژن و دی‌اکسید کربن را به میزان بیشتری نسبت به انتقال بخار آب تحت تأثیر قرار دهد.

هرچند که معمولاً کاهش محتوای اکسیژن برای نگهداری در بسته‌بندی‌های MAP مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶]؛ ولی استفاده از بسته‌بندی‌های دارای اکسیژن بیشتر از اکسیژن اتمسفر (بیش از ۷۰ درصد) به عنوان جایگزینی برای استفاده از بسته‌بندی‌های دارای اکسیژن کم، به منظور نگهداری محصولات تازه مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال نشان داده شده است که استفاده از بسته‌بندی MAP دارای غلظت اکسیژن فوق اتمسفری می‌تواند اثرات مثبتی در زمینه کاهش بار میکروبی و بهبود ویژگی‌های حسی سبزیجات و قارچ تازه بریده شده داشته باشد [۱۷] همچنین استفاده از غلظت ۸۰ و ۹۲ درصد اکسیژن در بسته‌بندی می‌تواند موجب مهار رشد *A. flavus* و *Cinerea B.* شده و از تخمیر بی‌هوازی نیز جلوگیری کرده و مانع از تغییر رنگ آنزیمی گردد [۱۸]. کاربرد بسته‌بندی دارای غلظت بالای اکسیژن برای دیگر محصولات گوشتی نیز با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹].

همچنین کاربرد بسته‌بندی MAP دارای غلظت بالای اکسیژن بر نگهداری زغال اخته در دو نوع فیلم با نفوذ گازهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده این موضوع بوده‌اند که زغال اخته ذخیره شده در فیلم با نفوذ گاز بالا، بالاترین امتیاز را از نظر بافت حسی و طعم زغال اخته به دست آورده و اتمسفر اولیه با اکسیژن با غلظت بالا تأثیر کمی بر کیفیت حسی داشته است [۲۰].

بین ۲ تا ۵ روز دارد که به دلیل رشد کپک و کاهش سریع کیفیت محدود می‌شود. در این بررسی نشان داده شده است که استفاده از بسته‌بندی دارای منفذ موجب کاهش کپک زدگی تمشک پس از ۲۰ روز شده است [۳۲].

۲-۵- بسته‌بندی MAP هوشمند

این نوع بسته‌بندی می‌تواند عملکردهای هوشمندی از قبیل تشخیص، سنجش، ضبط، ردیابی، برقراری ارتباط و اعمال منطق علمی را برای تسهیل تصمیم‌گیری در زمینه افزایش عمر مفید، افزایش ایمنی، بهبود کیفیت، ارائه اطلاعات، و هشدار در مورد مشکلات احتمالی اجرا نماید [۳۱]. چارچوب نظری که جریان اطلاعات را در یک سیستم هوشمند توصیف می‌کند از چهار جزء تشکیل شده است: دستگاه‌های بسته هوشمند، لایه‌های داده، پردازش داده‌ها و بزرگراه اطلاعات (شبکه‌های ارتباطی سیمی یا بی سیم) در زنجیره تأمین مواد غذایی [۳۴]، [۳۳]. دستگاه‌های بسته هوشمند، برچسب‌های ارزان قیمتی هستند که روی بسته‌بندی اولیه (به‌عنوان مثال، کیسه‌ها، ظروف سخت و بطری‌ها) چسبانده می‌شوند [۲۲]. دو نوع اساسی از دستگاه‌های بسته هوشمند وجود دارد: حامل‌های داده (مانند برچسب‌های بارکد و برچسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) که برای ذخیره و انتقال داده‌ها استفاده می‌شوند، و نشانگرهای بسته، مانند نشانگرهای زمان و دما، نشانگرهای گاز و حسگرهای زیستی، که برای نظارت بر محیط خارجی یا شرایط داخلی بسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفته و در صورت لزوم، می‌توانند هشدارهایی (به‌عنوان مثال با ایجاد تغییر رنگ) را صادر کنند [۳۵]، [۳۵] در بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده، بروز تغییر در ترکیب گازی درون بسته‌بندی می‌تواند شاخصی از بروز نشت یا فعالیت میکروارگانیسم‌ها باشد [۲۳]. در همین راستا نشانگرهای گاز به شکل برچسب یا چاپ روی فیلم‌های بسته‌بندی می‌تواند به نظارت بر ایمنی و کیفیت محصولات بسته‌بندی شده کمک کند [۳۶]. نشانگرهای اکسیژن پرکاربردترین نشانگر گاز هستند، این به دلیل توانایی اکسیژن در ایجاد تغییر رنگ اکسیداتیو و تاثیر این گاز در افزایش فساد میکروبی است. استفاده از یک حسگر اکسیژن غیر مخرب به‌عنوان نشانگر نشت پیشنهاد شده است. این حسگرها قادر به تشخیص سطوح بسیار پایین اکسیژن (۰/۰۰۷٪) بوده و عملکرد آنها بر اساس اندازه‌گیری شدت فسفرسانس و تغییر فاز بیان شده است [۳۷]. از سوی دیگر، نشانگرهای اکسیدکربن می‌توانند برای تشخیص فساد زودهنگام و همچنین برای نظارت بر سطوح این گاز در بسته‌های اتمسفر اصلاح‌شده در حمل و نقل و در انبارها استفاده شود [۳۸]، [۴۰].

طبقه‌بندی کرد که شامل استفاده از جاذب رطوبت تماسی [۴] و استفاده از جاذب رطوبت غیرتماسی است [۲۶]. به‌طور کلی، جاذب‌های تماس آب به صورت تجاری برای بسته‌بندی محصولات گوشتی مانند ماهی و گوشت گاو استفاده می‌شود [۲۷]. از میان انواع مختلف این نوع جاذب‌ها می‌توان به پدها، کیسه‌ها و لایه‌های سوپر جاذب اشاره کرد [۱۳]. استفاده از جذب‌کننده‌های رطوبت غیرتماسی در زمینه بسته‌بندی محصولات تازه مناسب‌تر است، چرا که این محصولات به صورت فعال تنفس و تعرق می‌کنند که موجب آزادسازی بخار آب در فضای بسته‌بندی می‌گردد [۲۸]. علاوه بر این، می‌توان برای برطرف ساختن این مشکل، از یک ماده بسته‌بندی با نفوذپذیری بالا نسبت به بخار آب یا ترکیبی از لایه‌های پلیمری مختلف برای بهینه‌سازی رطوبت درون بسته‌بندی استفاده کرد [۲۹]، [۲۳].

۲-۳-۴- هیدروژن

تأثیر بسته‌بندی MAP با استفاده از گاز هیدروژن در زمینه نگهداری از میگوی خشک در طول ذخیره‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این بررسی میگوی خشک به مدت ۸ روز در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵ درصد نگهداری شده و اثر ترکیب گازی حاوی مقادیر مختلف هیدروژن در مقایسه با نمونه شاهد (بسته‌بندی در اتمسفر هوا) از نظر ویژگی‌های حسی از جمله رنگ و بو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان دهنده اثر مثبت هیدروژن بر نگهداری و حفظ ویژگی‌های کیفی محصول بوده است [۳۰]. همچنین کاربرد بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده حاوی هیدروژن در نگهداری ماهی نیز مورد بررسی قرار گرفته است که اثرات مثبتی در زمینه نگهداری ماهی قزل‌آلای رنگین کمان در این بررسی گزارش شده است.

۲-۴-۱- ایجاد منافذ

ایجاد منافذ ریز با استفاده از لیزر CO₂ در فیلم‌های PLA و PBS تغییرات قابل توجهی در خواص مکانیکی استحکام کششی، مدول یانگ و ازدیاد طول ایجاد نکرده و در عین حال امکان دستیابی به نرخ مناسب‌تری از انتقال گازهای CO₂ و O₂ را فراهم کرده است. این منافذ که به‌عنوان مجرای انتقال دهنده یا لوله‌هایی برای تبادل گاز میان بسته‌بندی و محیط ایجاد می‌شوند می‌توانند نسبت نفوذپذیری بسته‌بندی نسبت به اکسیژن و دی‌اکسید کربن را به ۱ نزدیک نمایند [۳۱] که به معنای برابر شدن ورود و مصرف اکسیژن است. ویژگی مثبتی که منجر به استفاده از این فناوری در ابعاد صنعتی شده است.

تأثیر استفاده از بسته‌بندی MAP دارای منفذ بر نگهداری تمشک مورد بررسی قرار گرفته است. تمشک، ماندگاری کوتاهی

- [5] S. C. Fonseca, F. A. R. Oliveira, J. K. Brecht, and K. V. Chau, "Influence of low oxygen and high carbon dioxide on shredded Galega kale quality for development of modified atmosphere packages," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 35, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.postharvbio.2004.08.007.
- [6] B. Zhang, L. Ma, S. Deng, C. Xie, and X. Qiu, "Shelf-life of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as affected by weakly acidic electrolyzed water ice-glazing and modified atmosphere packaging," *Food Control*, vol. 51, pp. 114–121, May 2015, doi: 10.1016/j.foodcont.2014.11.016.
- [7] V. h. Escalona, E. Aguayo, and F. Artés, "Quality Changes of Fresh-Cut Kohlrabi Sticks under Modified Atmosphere Packaging," *Journal of Food Science*, vol. 72, no. 5, Art. no. 5, 2007, doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00353.x.
- [8] J. Bai, R. A. Saffner, and A. E. Watada, "Characteristics of fresh-cut honeydew (*Cucumis xmelo* L.) available to processors in winter and summer and its quality maintenance by modified atmosphere packaging," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 28, no. 3, Art. no. 3, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0925-5214(02)00209-0.
- [9] B. Horev, S. Sela, Y. Vinokur, E. Gorbatshevich, R. Pinto, and V. Rodov, "The effects of active and passive modified atmosphere packaging on the survival of *Salmonella enterica* serotype Typhimurium on washed romaine lettuce leaves," *Food Research International*, vol. 45, no. 2, Art. no. 2, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.foodres.2011.05.037.
- [10] C. Costa et al., "Effects of passive and active modified atmosphere packaging conditions on ready-to-eat table grape," *Journal of Food Engineering*, vol. 102, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.08.001.
- [11] S. Kartal, M. S. Aday, and C. Caner, "Use of microperforated films and oxygen scavengers to maintain storage stability of fresh strawberries," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 71, pp. 32–40, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.postharvbio.2012.04.009.
- [12] A. L. Brody, E. P. Strupinsky, and L. R. Kline, *Active Packaging for Food Applications*. CRC Press, 2001.
- [13] M. Ozdemir and J. D. Floros, "Active food packaging technologies," *Crit Rev Food Sci Nutr*, vol. 44, no. 3, pp. 185–193, 2004, doi: 10.1080/10408690490441578.
- [14] I. C. Munro, L. A. Haighton, B. S. Lynch, and S. Tafazoli, "Technological challenges of addressing new and more complex migrating products from novel food packaging materials," *Food Additives & Contaminants: Part A*, vol. 26, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2009, doi: 10.1080/02652030902995277.
- [15] Z. Hussein, O. J. Caleb, and U. L. Opara, "Perforation-mediated modified atmosphere packaging of fresh and minimally processed produce—A review," *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 6, pp. 7–20, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.foodpsl.2015.08.003.
- [16] C. Wang et al., "Quality retention and delay postharvest senescence of figs (*Ficus carica* L.) using 1-methylcyclopropene and modified atmosphere packaging during cold storage," *Food Bioscience*, vol. 53, p. 102748, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.foodb.2023.102748.
- [17] L. Jacxsens, F. Devlieghere, C. Van der Steen, and J. Debevere, "Effect of high oxygen modified atmosphere packaging on microbial growth and sensorial qualities of fresh-cut produce," *International Journal of Food Microbiology*, vol. 71, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0168-1605(01)00616-X.
- [18] Z. Ayhan and O. Eştürk, "Overall Quality and Shelf Life of Minimally Processed and Modified Atmosphere Packaged 'Ready-to-Eat' Pomegranate Arils," *Journal of Food Science*, vol. 74, no. 5, pp. C399–C405, Jun. 2009, doi: 10.1111/j.1750-3841.2009.01184.x.
- [19] K. Xin, K. Tian, Q. Yu, and L. Han, "High oxygen-modified packaging (HiOx-MAP) mediates HIF-1 α regulation of tenderness changes during postmortem aging of yak meat," *Food Chemistry: X*, vol. 17, p. 100573, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.fochx.2023.100573.
- [20] H. J. Rosenfeld, K. Røed Meberg, K. Haffner, and H. A. Sundell, "MAP of highbush blueberries: sensory quality in relation to storage temperature, film type and initial high oxygen atmosphere," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 16, no. 1, Art. no. 1, May 1999, doi: 10.1016/S0925-5214(98)00102-1.

شاخص‌های رنگ سنجی اغلب در بسته‌بندی مرغ مورد استفاده قرار گرفته است [۴۱]، [۳۴]. با استفاده از نشانگرهای pH و متالوپورفیرین‌ها نوعی حسگر ایجاد شده است که در شرایط مختلف pH رنگ‌های مختلفی را بر یک سطح سیلیکاژل ایجاد می‌کند [۴۲]. در تحقیقی دیگر، آرایه‌ای متشکل از ۱۶ ماده حسگر با استفاده از ترکیب رنگ‌های مختلف برای گوشت مرغ بسته‌بندی شده در شرایط اتمسفر اصلاح شده ایجاد شده است که در آن تغییرات رنگ آرایه، اطلاعاتی در زمینه ویژگی‌های ماندگاری گوشت مرغ در بسته‌بندی MAP آرایه کرده است. به طور کلی، عملکرد بیشتر این شاخص‌ها بر اساس تغییر رنگ در نتیجه یک واکنش شیمیایی یا آنزیمی است [۳۳]. در نتیجه بسته‌بندی هوشمند با استفاده حسگرهای شیمیایی و زیستی، شرایط ماده غذایی به لحاظ ایمنی، تازگی و مقدار گازهای اطراف محصول مانند اکسیژن و دی‌اکسیدکربن را پایش کرده و به این صورت فرصت ویژه‌ای در زمینه کنترل و بهینه‌سازی زنجیره تامین در اختیار قرار می‌دهد [۳۴].

۳- نتیجه‌گیری

بسته‌بندی MAP به عنوان یک فناوری روبه‌رشد در جهت دستیابی به کیفیت مناسب و ماندگاری بیشتر مواد غذایی با سیر تحولی بسیار متنوع ظهور کرده است و می‌تواند در کنار انواع مختلف فناوری‌های بسته‌بندی، به نحوی اختصاصی شرایط نگهداری مناسبی را برای محصول مورد نظر فراهم نماید. این موضوع می‌تواند منجر به کاهش ضایعات، افزایش ارزش افزوده و بهبود کیفیت محصولات شده و حرکتی رو به جلو در زمینه تولیدات غذایی به شمار آید. با توجه به کاربرد گسترده و رو به رشد این فناوری نیاز به نگاهی همه جانبه به کلیه شاخه‌های گستره این نوع بسته‌بندی وجود دارد چرا که این نوع نگاه می‌تواند شرایط را برای پیشرفت‌های آینده در حوزه بسته‌بندی مواد غذایی فراهم آورد.

۴- مراجع

- [1] N. Yamaguchi, "Vacuum Packaging," in *Food Packaging*, Elsevier, 1990, pp. 279–292. doi: 10.1016/B978-0-08-092395-6.50020-9.
- [2] G. Antmann, G. Ares, P. Lema, and C. Lareo, "Influence of modified atmosphere packaging on sensory quality of shiitake mushrooms," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 49, no. 1, pp. 164–170, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.01.020.
- [3] Y. Li, Y. Ishikawa, T. Satake, H. Kitazawa, X. Qiu, and S. Rungchang, "Effect of active modified atmosphere packaging with different initial gas compositions on nutritional compounds of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*)," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 92, pp. 107–113, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.12.017.
- [4] P. V. Mahajan, F. A. R. Oliveira, and I. Macedo, "Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms," *Journal of Food Engineering*, vol. 84, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.05.021.

- [33] R. Ahvenainen, "2 - Active and intelligent packaging: An introduction," in *Novel Food Packaging Techniques*, R. Ahvenainen, Ed., in Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, 2003, pp. 5–21. doi: 10.1533/9781855737020.1.5.
- [34] K. Urmila, H. Li, Q. Chen, Z. Hui, and J. Zhao, "Quantifying of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in chicken using a colorimetric sensor array and nonlinear regression tool," *Anal. Methods*, vol. 7, no. 13, Art.no. 13, Jun. 2015, doi: 10.1039/C5AY00596E.
- [35] I. S. Arvanitoyannis, A. D. Bouletis, E. A. Papa, D. C. Gkagtzis, C. Hadjichristodoulou, and C. Papaloucas, "The effect of addition of olive oil and 'Aceto balsamico di Modena' wine vinegar in conjunction with active atmosphere packaging on the microbial and sensory quality of 'Lollo Verde' lettuce and rocket salad," *Anaerobe*, vol. 17, no. 6, Art. no. 6, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.anaerobe.2011.04.010.
- [36] K. L. Yam, P. T. Takhistov, and J. Miltz, "Intelligent Packaging: Concepts and Applications," *Journal of Food Science*, vol. 70, no. 1, pp. R1–R10, Jan. 2005, doi: 10.1111/j.1365-2621.2005.tb09052.x.
- [37] M. Smiddy, N. Papkovskaia, D. B. Papkovsky, and J. P. Kerry, "Use of oxygen sensors for the non-destructive measurement of the oxygen content in modified atmosphere and vacuum packs of cooked chicken patties; impact of oxygen content on lipid oxidation," *Food Research International*, vol. 35, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0963-9969(01)00160-0.
- [38] S.-I. Hong and W.-S. Park, "Use of color indicators as an active packaging system for evaluating kimchi fermentation," *Journal of Food Engineering*, vol. 46, no. 1, Art.no. 1, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0308-8146(00)00141-2.
- [39] S. Neethirajan, D. S. Jayas, and S. Sadistap, "Carbon Dioxide (CO₂) Sensors for the Agri-food Industry—A Review," *Food Bioprocess Technol*, vol. 2, no. 2, Art.no. 2, Jun. 2009, doi: 10.1007/s11947-008-0154-y.
- [40] E. Poyatos-Racionero, J. V. Ros-Lis, J.-L. Vivancos, and R. Martínez-Mañez, "Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 3398–3409, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.075.
- [41] Q. Chen, Z. Hui, J. Zhao, and Q. Ouyang, "Evaluation of chicken freshness using a low-cost colorimetric sensor array with AdaBoost-OLDA classification algorithm," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 57, no. 2, Art.no. 2, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.lwt.2014.02.031.
- [42] Y. Salinas et al., "Monitoring of chicken meat freshness by means of a colorimetric sensor array," *Analyst*, vol. 137, no. 16, Art.no. 16, Jul. 2012, doi: 10.1039/C2AN35211G.
- [43] M. Ravaghi, "Tracing of Packages in Supply Chain Based on IoT and Blockchain Technologies," *Packaging Science and Art*, vol. 12, no. 47, pp. 57–64, Nov. 2021, (in Persian) doi: 10.1001.1.22286675.1400.12.47.6.4
- [21] M. Ahmed, A. R. M. Yousef, and S. M. A. Sarry, "Modified Atmosphere Packaging for Maintaining Quality and Shelf Life Extension of Persimmon Fruits," 2011.
- [22] S. C. Fonseca, F. A. R. Oliveira, and J. K. Brecht, "Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review," *Journal of Food Engineering*, vol. 52, no. 2, Art. no. 2, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0260-8774(01)00106-6.
- [23] O. J. Caleb, U. L. Opara, and C. R. Witthuhn, "Modified Atmosphere Packaging of Pomegranate Fruit and Arils: A Review," *Food Bioprocess Technol*, vol. 5, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2012, doi: 10.1007/s11947-011-0525-7.
- [24] G. Linke and M. Geyer, "Condensation dynamics in plastic film packaging of fruit and vegetables," *Journal of Food Engineering*, vol. 116, no. 1, Art.no. 1, May 2013, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.11.026.
- [25] G. G. Bovi, O. J. Caleb, M. Linke, C. Rauh, and P. V. Mahajan, "Transpiration and moisture evolution in packaged fresh horticultural produce and the role of integrated mathematical models: A review," *Biosystems Engineering*, vol. 150, pp. 24–39, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.07.013.
- [26] G. Rux et al., "Application of humidity-regulating tray for packaging of mushrooms," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 108, pp. 102–110, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.06.010.
- [27] Z. Fang, Y. Zhao, R. D. Warner, and S. K. Johnson, "Active and intelligent packaging in meat industry," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 61, pp. 60–71, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.tifs.2017.01.002.
- [28] G. G. Bovi, O. J. Caleb, K. Ilte, C. Rauh, and P. V. Mahajan, "Impact of modified atmosphere and humidity packaging on the quality, off-odour development and volatiles of 'Elsanta' strawberries," *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 16, pp. 204–210, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.fpsl.2018.04.002.
- [29] S. Volpe, P. V. Mahajan, G. Rux, S. Cavella, and E. Torrieri, "Condensation and moisture regulation in packaged fresh-cut iceberg lettuce," *Journal of Food Engineering*, vol. 216, pp. 132–137, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.08.015.
- [30] K. Jiang, Y. Zhang, C. Cai, W. Lin, L. Li, and W. Shen, "Hydrogen-based modified atmosphere packaging delays the deterioration of dried shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) during accelerated storage," *Food Control*, vol. 152, p. 109897, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.foodcont.2023.109897.
- [31] Sandhya, "Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 43, no. 3, Art. no. 3, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.lwt.2009.05.018.
- [32] N. K. Huynh, M. D. Wilson, and R. A. Stanley, "Extending the shelf life of raspberries in commercial settings by modified atmosphere/modified humidity packaging," *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 37, p. 101069, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.fpsl.2023.101069.