

# ارزیابی بسته‌بندی مواد غذایی از دیدگاه مهندسی و تعیین مدت ماندگاری محصولات غذایی بسته‌بندی شده

سید مهدی جعفری<sup>۱\*</sup>، امیر هارونی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت مقاله: شهریورماه ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: مهرماه ۱۳۹۲

## چکیده

بسته‌بندی مواد غذایی در پاسخ به نیاز حفاظت محصولات غذایی از محیط‌های داخلی و خارجی و همچنین در پاسخ به انتظار مصرف‌کنندگان برای آسایش و امنیت محصولات گسترش یافت. تحقیقات اخیر نشان داده است که ۷۲٪ از مصرف‌کنندگان در آمریکا حاضرند مقدار پول بیشتری برای اطمینان از تازگی محصول دریافتی به وسیله انواع بسته‌بندی‌ها پرداخت نمایند. بسیاری از بسته‌بندی‌هایی که اخیراً گسترش یافته‌اند روی افزایش عمر ماندگاری محصول و کیفیت بالاتر محصول تحولی به مصرف‌کننده تأکید دارند. این پیشرفت‌ها بدون بهبود مواد مصرفی در بسته‌بندی‌ها، استفاده از انواع مختلف سنسورها در بسته‌بندی مواد غذایی و کاربرد اصول مهندسی امکان‌پذیر نخواهد بود. در این مقاله، سعی شده است بسته‌بندی مواد غذایی از دیدگاه مهندسی مورد بحث و بررسی قرار گیرد و در نهایت، روش ارزیابی مدت ماندگاری توضیح داده خواهد شد.

## واژه‌های کلیدی

اصول مهندسی، بسته‌بندی، انتقال جرم، نفوذپذیری و مدت ماندگاری.

## ۱- مقدمه

براساس پیشینه تاریخی، بسته‌بندی مواد غذایی در پاسخ به انتظارات مختلفی گسترش یافت. وظایف بسته‌بندی غذا توسط محققان [۴، ۷، ۸] و [۱۷] به رشته تحریر در آمده است. چهار وظیفه اصلی بسته‌بندی غذا عبارتست از:

- دربرگیری<sup>۳</sup>

- محافظت<sup>۴</sup>

- برقراری رابطه<sup>۵</sup>

- راحتی استفاده<sup>۶</sup>

"دربرگیری"، به وسیله نوع محصول غذایی تعیین می‌گردد، زیرا مثلاً برای مایعات در مقایسه با جامدات یا مواد پودری، انواع مختلف بسته‌بندی مورد نیاز می‌باشد. "محافظت" از محصول، یک وظیفه کلیدی برای اکثر بسته‌بندی‌ها است؛ تا کیفیت و ایمنی ماده غذایی حفظ گردد. مشهودترین وظیفه‌ی "برقراری ارتباط" عبارتست از: ارائه‌ی انواع مختلف اطلاعات روی سطح خارجی بسته‌بندی؛ که شامل توصیف ساده محصول و جزئیات ترکیبات محصول می‌باشد. "راحتی استفاده" در بسیاری از مواد غذایی بیشتر وابسته به طراحی بسته‌بندی می‌باشد. این چهار وظیفه اصلی بسته‌بندی مواد غذایی در مورد محصولات غذایی مختلف سطح اهمیت‌های مختلفی پیدا می‌کنند. عوامل دیگری که در بسته‌بندی ماده غذایی

۱- گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی - دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

(\*) نویسنده مسئول: (ir.ac.gau@smjafari)

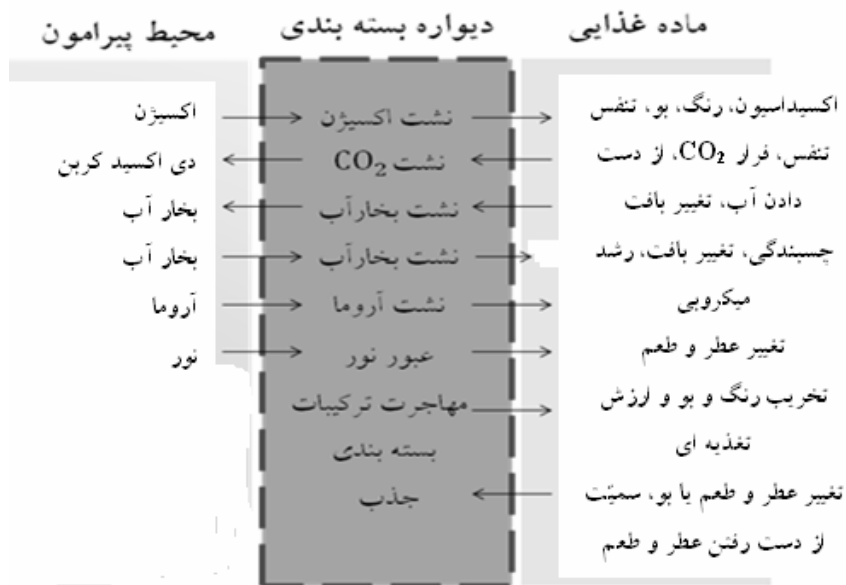
۲- گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

3- Containment

4- Protection

5- Communication

6- Convenience



شکل ۱- واکنش‌های بین غذا، بسته‌بندی و محیط

عمر ماندگاری<sup>۱</sup> مواد غذایی تازه به تماس مستقیم دی‌اکسید کربن با محصول بستگی دارد. همچنین، غلظت بخار آب در محیط در تماس با مواد غذایی خشک و/یا مواد غذایی با رطوبت متوسط، باید کنترل گردد. در تمامی موارد، ویژگی‌های مواد بسته‌بندی نقش بارزی در افزایش عمر ماندگاری و محصول دارد.

### ۳- دربرگرفتن محصول

وظیفه بسته‌بندی برای دربرگیری محصول غذایی به طور مستقیم به مواد اولیه مرتبط است. انواع موادی که برای بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود شامل شیشه، فلز، پلاستیک و کاغذ است. هر کدام از این مواد بسته‌بندی، ویژگی‌های خاص خود را داشته و کاربردهای گوناگونی برای بسته‌بندی مواد غذایی دارند. ظروف شیشه‌ای یک مانع مطلق در برابر گازها، بخار آب، و مواد معطر غذا هستند، اما محصولات حساس به نور را از نور موجود در محیط اطراف بسته‌بندی محافظت نمی‌کنند. عیب اصلی شیشه در مقایسه با دیگر بسته‌بندی‌ها، وزن آن است.

مؤثر است شامل کارایی در ساخت بسته، نحوه برخورد بسته با محیط، و سطح امنیت غذایی تأمین شده به وسیله بسته‌بندی می‌باشد.

### ۲- محافظت از غذا

میزان درجه محافظت مورد نیاز محصول غذایی یکی از عوامل کلیدی در انتخاب ماده بسته بندی و طراحی آن است. شکل (۱) نقش بسته‌بندی در این رابطه را به طور خلاصه شرح می‌دهد.

به طور کلی، محافظت در شاخص‌های مختلفی تعریف می‌گردد که می‌توانند ویژگی‌های کیفی محصول غذایی را از زمانی که محصول درون بسته قرار داده می‌شود تا زمانی که مصرف می‌شود، شامل شود. ویژگی‌های بسته‌بندی تحت تأثیر شاخص‌های محیطی مثل اکسیژن، نیتروژن، دی‌اکسید کربن، بخار آب یا مواد معطر، تماس مستقیم یا غیرمستقیم با محصول، قرار می‌گیرد. بسیار از مواد غذایی به اکسیژن (حتی در میزان غلظت اکسیژن محیط اطراف) حساس‌اند زیرا تخریب مرتبط با اکسایش رخ می‌دهد.

1- Shelf life

ظروف فلزی برای تعداد زیادی از محصولات غذایی با ماندگاری طولانی<sup>۱</sup> مثل کنسرو میوه و سبزی استفاده می‌شوند و یک جایگزین عالی برای ظروف شیشه‌ای هستند. فلزاتی که در این ظروف به کار می‌روند عبارتند از: فولاد، قلع و آلومینیوم که هر کدام کاربرد خاصی برای مواد غذایی و نوشیدنی‌ها دارند. ظروف فلزی به دلیل مقاومت ساختاری، برای مواد غذایی فرآوری شده به وسیله حرارت و فرآیند در اتوکلاوهایی با دما و فشار بالا استفاده شده‌اند. ظروف فلزی نسبتاً سنگین هستند و فرآیند ساخت این ظروف پیچیده است.

مواد بسته‌بندی پلاستیکی برای انواع مختلف محصولات غذایی استفاده می‌شوند و روز به روز بر تعداد آن‌ها افزوده می‌گردد. اکثر مواد بسته‌بندی پلاستیکی یا از پلی‌مرهای نوع ترموپلاستیک<sup>۲</sup> و یا ترموست<sup>۳</sup> هستند. پلی‌مرهای ترموپلاستیک، مواد اصلی (پایه‌ای) استفاده شده برای تعداد زیادی از محصولات غذایی هستند و بر مبنای نیازهای خاص مواد غذایی، انعطاف پذیری قابل توجهی در طراحی بسته‌بندی‌ها از خود نشان می‌دهند فیلم‌های پلاستیکی سبک وزن هستند و یک نمای شفاف از محصول درون بسته‌بندی را فراهم می‌آورند. نفوذپذیری پلی‌مرها نسبت به اکسیژن، دی‌اکسیدکربن، نیتروژن، بخار آب، و ترکیبات معطر، هم باعث ایجاد مشکلات و هم ایجاد فرصت‌هایی در طراحی مواد بسته‌بندی برای احتیاجات خاص مواد غذایی شده است. کاغذ به دلیل استفاده گسترده در همه سطوح بسته‌بندی، نسبت به دیگر مواد بسته‌بندی به مقدار بیشتری مورد استفاده قرار گرفته است. کاغذ متنوع‌ترین و انعطاف‌پذیرترین نوع مواد است. عیب اصلی آن عدم ممانعت در برابر اکسیژن، بخار آب، و عوامل مشابهی است که باعث کاهش کیفیت محصول می‌شوند.

#### ۴- ارتباط با محصول

بسته محصولات غذایی برای رساندن اطلاعات مکتوب در مورد محصول به مصرف‌کنندگان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اطلاعات روی برچسب ارائه می‌شوند و هم شامل اطلاعات قانونی لازم در مورد ترکیبات و همچنین اطلاعات موردنیاز برای بازاریابی محصول می‌باشد.

#### ۵- راحتی استفاده از محصول

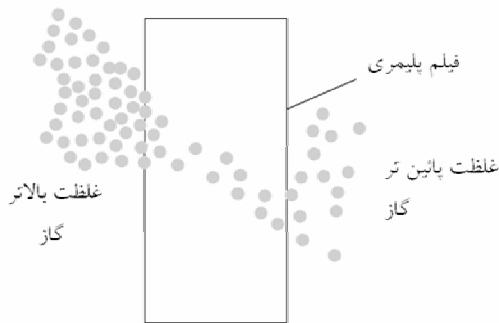
انواع مختلف طرح‌های به کارگرفته شده در بسته‌بندی مواد غذایی در تلاش‌اند تا راحتی استفاده آن را افزایش دهند. این طراحی‌ها شامل ابداعات در مورد باز کردن بسته‌بندی، راحتی در یکنواخت کردن محصول، امکان بستن دوباره آن پس از بازکردن، و کاملاً مهیا کردن محصول برای مصرف می‌باشند. علاوه بر این، انجام نوآوری‌ها برای ایجاد راحتی در آینده، ادامه خواهد یافت.

#### ۶- انتقال جرم در مواد بسته‌بندی

یکی از نیازمندی‌های مهم در انتخاب بسته‌بندی برای مواد غذایی، ویژگی‌های ممانعتی مواد بسته‌بندی می‌باشد. برای حفظ یک محصول ترد و تازه، بسته‌بندی باید مانعی در برابر رطوبت باشد. تندشدگی<sup>۴</sup> با محافظت غذا از نور به حداقل می‌رسد. برای کاهش اکسایش ترکیبات غذایی، مواد بسته‌بندی باید مانع خوبی در برابر اکسیژن باشند. مواد معطر اصلی ترکیبات عطر و طعم مواد غذایی را می‌توان با استفاده از مواد بسته‌بندی نگهداری کرد به شرطی که مانعی محکم در برابر خروج مواد معطر خاص ایجاد کنند. بنابراین، انتخاب مواد بسته‌بندی مناسب در افزایش عمر ماندگاری مواد غذایی بسیار مفید است.

- 1- Shelf-Stable
- 2- Thermoplastic
- 3- Thermoset

$$\frac{m_B}{A} = \frac{D_B(C_{B1} - C_{B2})}{(x_2 - x_1)}$$



شکل ۲- انتقال جرم گاز از میان یک ماده پلی‌مری

این معادله برای تعیین شار،  $\dot{m}_B/A$  کافی خواهد بود، اما اندازه‌گیری غلظت یک گاز در سطح فیلم نسبت به اندازه‌گیری فشار نسبی آن بسیار مشکل است. این غلظت‌ها را می‌توان با استفاده از قانون هنری<sup>۴</sup> به فشار نسبی تبدیل نمود،

$$c = Sp$$

که در آن S قابلیت انحلال ( $[cm^3 atm]/[mol]$ ) و p فشار نسبی گاز (atm) می‌باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\dot{m}_B = \frac{D_B SA (p_{B1} - p_{B2})}{(x_2 - x_1)}$$

مقدار  $D_B S$  و همچنین ضریب نفوذپذیری  $p_B$  معلوم می‌باشد.

$$p_B = \frac{(\text{ضخامت فیلم}) (\text{مقدار بخار گاز})}{(\text{اختلاف فشار در عرض فیلم}) (\text{زمان}) (\text{مساحت})}$$

انواع متفاوتی از واحدها برای گزارش ضریب نفوذپذیری مورد استفاده قرار می‌گیرند (جدول ۱).

شاخص دیگری که توسط برخی از محققان استفاده شده است، نشت (نفوذ پذیری)<sup>۵</sup> می‌باشد که این شاخص واحد ضخامت را در نظر نگرفته است. گاهی نشت بخار آب<sup>۶</sup> با واحدهایی گزارش می‌شود که نه واحد ضخامت و نه واحد فشار در آن در نظر گرفته نشد است؛ بنابراین این

ویژگی ممانعتی مواد بسته‌بندی را می‌توان با واژه نفوذپذیری<sup>۱</sup> توصیف کرد.

نفوذپذیری مواد بسته‌بندی نشان می‌دهد که یک گاز خاص یا بخار چه طور می‌تواند در ماده بسته‌بندی نفوذ کند. در تعریف عددی، نفوذپذیری برابر است با جرم گاز یا بخار عبوری به ازای واحد زمان، مساحت و یک "نیروی رانش"<sup>۲</sup>. در حالتی که انتقال جرم به سختی انجام می‌گیرد، نیروی رانش همان اختلاف غلظت یا فشار نسبی است. اگر نیروی رانش برابر اختلاف فشار کل باشد، انتقال جرم به دلیل جریان حجمی یک گاز یا بخار رخ می‌دهد.

یک پوسته‌ی پلی‌مری را می‌توان همانند لولیدن یک گروه از کرم‌ها در نظر گرفت که در آن کرم‌ها، بیانگر رشته‌های طولیل پلی‌مری می‌باشند. فضای بین کرم‌ها شبیه فضای شکافی است که بین گونه‌ها و فازها وجود دارد. لولیدن کرم‌ها نیز بیانگر حرکت حرارتی رشته‌های پلی‌مری در اثر حرارت از خود نشان می‌دهند.

انتقال جرم از میان مواد پلی‌مری را می‌توان به عنوان یکی از مراحل فرآیند توصیف نمود. با مراجعه به (شکل ۲)، در مرحله ۱، بخار گاز یا مولکول‌های مایع در مواد پلی‌مری در سمت فیلمی که در معرض غلظت بیشتر قرار می‌گیرد حل می‌شوند. در مرحله ۲، مولکول‌های بخار یا گاز به درون مواد پلی‌مری نفوذ می‌کنند و به سمت فیلمی که در معرض غلظت کمتر قرار دارد، حرکت می‌کنند. حرکت مولکول‌ها به دلیل تغییرات دمایی، زنجیره‌های بلند پلی‌مری در غشاء پلی‌مری حرکت نموده و گاهی اوقات روی هم قرار گرفته و از این رو روزنه‌های در غشاء پلی‌مری ایجاد می‌شود.

مرحله ۳، شامل دفع مولکول‌های گاز یا بخار و تبخیر از سطح فیلم می‌باشد.

می‌توان از قانون انتشار فیک<sup>۳</sup> برای به دست آوردن معادله فرآیند انتقال گاز از میان یک ماده پلی‌مری استفاده کرد بدین صورت؛

4- Henry's law

5- Permeance

6- Permeance

1- permeability

2- Driving force

3- Fick's law

جدول ۱- ضرایب تبدیل مربوط به واحدهای متفاوت ضریب

نفوذپذیری

	$\frac{\text{cm}^3 \text{ cm}}{\text{s cm}^2 (\text{cmHg})}$	$\frac{\text{cm}^3 \text{ cm}}{\text{s cm}^2 (\text{Pa})}$	$\frac{\text{cm}^3 \text{ cm}}{\text{day m}^2 (\text{atm})}$
$\frac{\text{cm}^3 \text{ cm}}{\text{s cm}^2 (\text{cmHg})}$	1	$7.5 \times 10^{-4}$	$6.57 \times 10^{10}$
$\frac{\text{cm}^3 \text{ mm}}{\text{s cm}^2 (\text{cmHg})}$	$10^{-1}$	$7.5 \times 10^{-5}$	$6.57 \times 10^9$
$\frac{\text{cm}^3 \text{ mm}}{\text{s cm}^2 (\text{atm})}$	$1.32 \times 10^{-2}$	$9.9 \times 10^{-6}$	$8.64 \times 10^8$
$\frac{\text{cm}^3 \text{ mil}}{\text{day m}^2 (\text{atm})}$	$3.87 \times 10^{-14}$	$2.9 \times 10^{-17}$	$2.54 \times 10^{-3}$
$\frac{\text{in}^3 \text{ mil}}{\text{day } 100 \text{ in}^2 (\text{atm})}$	$9.82 \times 10^{-12}$	$7.37 \times 10^{-15}$	$6.46 \times 10^{-1}$
$\frac{\text{cm}^3 \text{ cm}}{\text{day m}^2 (\text{atm})}$	$1.52 \times 10^{-11}$	$1.14 \times 10^{-14}$	1

واضح است که برای هر گاز، مواد با نفوذپذیری‌های مختلف وجود دارند. برای مثال، نفوذپذیری ساران<sup>۲</sup> (نوعی پلی‌مر) نسبت اکسیژن؛ ۱۰۰۰۰۰ برابر کمتر از لاستیک سیلیکون<sup>۳</sup> است. علاوه بر این، نظم و قاعده خاصی در عبور گازهای مختلف از یک نوع ماده وجود دارد. مثلاً، دی اکسید کربن نسبت به اکسیژن، چهار تا شش برابر سریع‌تر نفوذ می‌کند و اکسیژن چهار تا شش برابر سریع‌تر از نیتروژن نفوذ می‌کند. به دلیل اینکه دی اکسید کربن نسبت به مولکول‌های سه گاز دیگر بزرگ‌تر است، انتظار می‌رود ضریب انتشار آن کمتر باشد و اتفاقاً کمتر نیز هست، اما ضریب نفوذپذیری آن بالاست زیرا حلالیت S آن در پلی‌مرها خیلی بیشتر از بقیه گازهاست.

گازهای غلظت ثابت همچنین رفتار ایده‌آل دیگری نیز نشان می‌دهد:

۱. نفوذپذیری را می‌توان غیر وابسته به غلظت در نظر گرفت.

۲. تغییر نفوذپذیری نسبت به دما با رابطه زیر مطابقت دارد:

$$P = P_0 e^{-E_p/RT}$$

که در آن  $E_p$  انرژی فعال‌سازی نفوذپذیری با واحد (k cal/mol) است.

برای برخی مواد (پلی‌مرها) در منحنی دمای نفوذپذیری یک شکست وجود دارد، و بالای دمای بحرانی ماده، نفوذپذیری خیلی زیاد است. این دما برای پلی‌وینیل استات حدود  $30^\circ\text{C}$  و برای پلی‌استایرن برابر  $80^\circ\text{C}$  می‌باشد. شکست‌ها به دلیل دمای انتقال شیشه‌ای  $T_g$  پایین و بالاست که در حالت شیشه‌ای و در حالت دوم ماده در حالت لاستیکی است.

به عنوان مثال ضریب نفوذ برای یک فیلم پلی‌اتیلن  $0.1 \text{ mm}$  از طریق ایجاد اختلاف فشار بخار آب در دو سوی یک فیلم درزبندی شده با استفاده از یک دستگاه

مقادیر باید با ضخامت، رطوبت، و دمای ویژه گزارش شوند. برای مثال، نفوذپذیری بخار آب به صورت مقدار گرم آب به ازای روز، به ازای  $100$  سانتی‌متر مربع از سطح بسته برای یک ضخامت ویژه و دما و/یا یک رطوبت نسبی تقریباً  $0\%$  در یک سمت و رطوبت نسبی  $95\%$  در سمت دیگر تعریف می‌شود.

## ۱-۶- نفوذپذیری مواد بسته‌بندی به گازهای با غلظت ثابت<sup>۱</sup>

گازهایی همچون اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و دی اکسید کربن که نقطه جوش پائینی دارند، به گازهای با غلظت ثابت گفته می‌شوند. آن‌ها در نفوذپذیری از میان مواد بسته‌بندی، رفتاری شبیه گاز ایده‌آل دارند. نفوذپذیری  $\text{O}_2$ ،  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  برای چندین ماده پلی‌مری در (جدول ۲) نشان داده شده است.

2- Saran

3- Silicone rubber

1- Fixed gases

جدول ۲- ضرایب نفوذپذیری، ثابت انتشار و ضرایب حلالیت پلی‌مرهای مختلف

Polymer	Permeant	T[°C]	P × 10 <sup>10</sup>	D × 10 <sup>6</sup>	S × 10 <sup>2</sup>
Poly(ethylene) (density 0.914)	O <sub>2</sub>	25	2.88	0.46	4.78
	CO <sub>2</sub>	25	12.6	0.37	25.8
	N <sub>2</sub>	25	0.969	0.32	2.31
	H <sub>2</sub> O	25	90		
Poly(ethylene) (density 0.964)	O <sub>2</sub>	25	0.403	0.170	1.81
	CO <sub>2</sub>	25	1.69	0.116	11.1
	CO	25	0.193	0.096	1.53
	N <sub>2</sub>	25	0.143	0.093	1.17
	H <sub>2</sub> O	25	12.0		
Poly(propylene)	H <sub>2</sub>	20	41	2.12	
	N <sub>2</sub>	30	0.44		
	O <sub>2</sub>	30	2.3		
	CO <sub>2</sub>	30	9.2		
	H <sub>2</sub> O	25	51		
Poly(oxyethyleneoxyterephthaloyl) (Poly(ethylene terephthalate)) crystalline	O <sub>2</sub>	25	0.035	0.0035	7.5
	N <sub>2</sub>	25	0.0065	0.0014	5.0
	CO <sub>2</sub>	25	0.17	0.0006	200
	H <sub>2</sub> O	25	130		
Cellulose acetate	N <sub>2</sub>	30	0.28		
	O <sub>2</sub>	30	0.78		
	CO <sub>2</sub>	30	22.7		
	H <sub>2</sub> O	25	5500		
Cellulose (Cellophane)	N <sub>2</sub>	25	0.0032		
	O <sub>2</sub>	25	0.0021		
	CO <sub>2</sub>	25	0.0047		
	H <sub>2</sub> O	25	1900		
Poly(vinyl acetate)	O <sub>2</sub>	30	0.50	0.055	6.3
Poly(vinyl alcohol)	H <sub>2</sub>	25	0.009		
	N <sub>2</sub>	14 <sup>b</sup>	<0.001		
		14 <sup>c</sup>	0.33	0.045	5.32
	O <sub>2</sub>	25	0.0089		
	CO <sub>2</sub>	25	0.012		
		23 <sup>b</sup>	0.001		190
	23 <sup>d</sup>	11.9	0.0476		
	ethylene oxide	0	0.002		
Poly(vinyl chloride)	H <sub>2</sub>	25	1.70	0.500	2.58
	N <sub>2</sub>	25	0.0118	0.00378	2.37
	O <sub>2</sub>	25	0.0453	0.0118	2.92
	CO <sub>2</sub>	25	0.157	0.00250	47.7
	H <sub>2</sub> O	25	275	0.0238	8780.0
Poly(vinylidene chloride) (Saran)	N <sub>2</sub>	30	0.00094		
	O <sub>2</sub>	30	0.0053		
	CO <sub>2</sub>	30	0.03		
	H <sub>2</sub> O	25	0.5		
Poly(imino (1-oxohexamethylene)) (Nylon 6)	N <sub>2</sub>	30	0.0095		
	O <sub>2</sub>	30	0.038		
	CO <sub>2</sub>	20	0.088		
		30 <sup>b</sup>	0.10		
		30 <sup>c</sup>	0.29		
	H <sub>2</sub> O	25	177		
Poly(imino (1-oxoundecamethylene)) (Nylon 11)	CO <sub>2</sub>	40	1.00	0.019	40

ارزیابی بسته‌بندی مواد غذایی از دیدگاه مهندسی و تعیین مدت ماندگاری محصولات غذایی بسته‌بندی شده

<sup>a</sup> واحدهای به کار رفته عبارتند از: فشار برحسب  $[\text{cm}^3(\text{STP})\text{cmcm}^{-2}\text{s}^{-1}(\text{cmHg})^{-1}]$  ضریب نفوذپذیری برحسب  $[\text{cm}^2\text{s}^{-1}]$  ضریب حلالیت برحسب  $[\text{cm}^3(\text{STP})\text{cm}^{-3}\text{atm}^{-1}]$  برای به دست آوردن ضرایب مربوطه در سامانه SI باید از شاخص‌های زیر استفاده نمود:

$$P \times 7.5 \times 10^{-4} = [\text{cm}^3(\text{STP})\text{cmcm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}], S \times 0.987 \times 10^{-5} = [\text{cm}^3(\text{stp})\text{cm}^{-3}\text{Pa}^{-1}]$$

آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. رطوبت بخار یک طرف فیلم در رطوبت نسبی ۹۰٪ نگه داشته می‌شود و با استفاده از نمک (ZnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O)، یک سمت آن در رطوبت نسبی ۱۰٪ نگه داشته می‌شود. مساحت فیلم در معرض انتقال بخار ۱۰cm در ۱۰cm است. زمانی که آزمایش در ۳۰ °C انجام می‌شود، بعد از ۲۴ ساعت، نمک ۵۰ گرم افزایش وزن می‌یابد. با استفاده از اطلاعات داده شده، ضریب نفوذ فیلم را محاسبه کنید.

**داده‌ها**

$$\text{ضخامت فیلم } 1 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.1 \text{ mm}$$

$$\text{رطوبت نسبی بالا } 90\%$$

$$\text{رطوبت نسبی پائین } 10\%$$

$$\text{دما } 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{مساحت فیلم } 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2 = 0.01 \text{ m}^2$$

$$\text{شدت جریان رطوبت } 0.024 \text{ g/h}$$

**حل**

۱. با استفاده از معادله اصلاح شده با فشار بخار داریم؛

$$\phi = \frac{P_w}{P_{ws}} \times 100$$

۲. می‌دانیم؛

$$P_{ws} = 4.246 \text{ kPa at } 30^\circ\text{C}$$

۳. از مراحل ۱ و ۲، در رطوبت نسبی ۱۰٪ داریم؛

$$P_w = 4.246 \times 10 / 100 = 0.4246 \text{ kPa}$$

در رطوبت نسبی ۹۰٪ نیز؛

$$P_w = 4.246 \times 90 / 100 = 3.821 \text{ kPa}$$

با استفاده از معادله مربوطه و حل ضریب نفوذپذیری

داریم؛

$$P_B = \frac{(5.787 \times 10^{-4} \text{ g water/s})(1 \times 10^{-4} \text{ m})}{(0.01 \text{ m}^2)(3.821 \text{ kPa} - 0.4246 \text{ kPa})(1000 \text{ Pa/kPa})}$$

$$P_B = 1.7 \times 10^{-9} \text{ [(g water m)/(m}^2 \text{ Pa s)]}$$

۴. ضریب نفوذپذیری فیلم برابر  $1/7 \times 10^{-9}$  [(g water m)/(m<sup>2</sup> Pa s)]

محاسبه شد، که می‌توان واحد آن را به

واحدهای مطلوب دیگر در (جدول ۱) تبدیل نمود.

## ۷- بسته‌بندی مواد غذایی و عمر ماندگاری

### محصول

به کارگیری نوع بسته‌بندی برای محصول غذایی می‌تواند تأثیر زیادی روی عمر ماندگاری آن داشته باشد. این تأثیر بیشتر مربوط به نوع محافظتی است که توسط بسته‌بندی تأمین می‌گردد که قبلاً به آن اشاره شد. تأثیر بسته را می‌توان با استفاده از اطلاعات فسادپذیری محصول با در نظر گرفتن نوع محافظتی که به وسیله بسته‌بندی صورت می‌گیرد، تعیین کرد. در همین زمینه، ابتدا روابط ریاضی را که توصیف‌کننده‌ی فساد محصولات غذایی در هنگام ذخیره‌سازی است، بیان خواهد شد.

### ۱-۷- مبانی علمی برای ارزیابی عمر ماندگاری

مبانی علمی برای ارزیابی عمر ماندگاری محصولات غذایی بر مبنای سینتیک‌های<sup>۱</sup> شیمیایی است [۵ و ۱۱]. در این بخش، تغییرات ویژگی‌های کیفی Q، با گذشت زمان ارزیابی خواهد شد. معادله عمومی سرعت تغییرات ویژگی‌های کیفی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\pm \frac{d[Q]}{dt} = k[Q]^n$$

که در آن  $\pm$  نشان‌دهنده ویژگی کیفی است و می‌تواند

در طی ذخیره‌سازی، افزایش یا کاهش یابد، k ثابت سرعت شبه جلو رونده، و n مرتبه واکنش است. ابتدا فرض می‌کنید عوامل محیطی که روی عمر ماندگاری اثر می‌گذارند مثل دمای ذخیره‌سازی، رطوبت و نور ثابت نگه داشته می‌شوند. اگر ویژگی‌های کیفی با گذشت زمان کاهش یابد، بنابراین می‌توان معادله فوق را به صورت زیر نوشت؛

$$- \frac{d[Q]}{dt} = k[Q]^n$$

### 1- Synthetic

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون

**بسته‌بندی**

$$[Q_i] - [Q] = kt$$

در معادله مذکور، سمت چپ به معنی گسترش واکنش،  $k$ ، برای واکنشی است که از سینتیک مرتبه صفر تبعیت می‌کند، بنابراین؛

$$\xi = kt$$

اگر تعیین کنید انتهای عمر ماندگاری محصول  $t_s$  زمانی فرا می‌رسد که ویژگی‌های کیفی،  $Q$ ، به  $Q_f$  برسد، بنابراین خواهیم داشت؛

$$[Q_f] = [Q_i] - kt_s$$

یا می‌توان گفت، عمر ماندگاری ماده غذایی که ویژگی‌های کیفی آن از سینتیک مرتبه صفر تبعیت می‌کند برابر است با؛

$$t_s = \frac{[Q_i] - [Q_f]}{k}$$

### ۷-۱-۲- واکنش مرتبه اول

در این بخش مطالعه عمر ماندگاری محصولاتی را مورد بررسی قرار می‌دهد که نمودار آن‌ها، یک کاهش نمایی<sup>۱</sup> در ویژگی‌های کیفی را نشان می‌دهد. در این مطالعه، سرعت افت ویژگی‌های کیفی وابسته به مقدار ویژگی کیفی باقی‌مانده است. واکنش‌های فساد غذایی که یک کاهش نمایی را نشان می‌دهند شامل از دست رفتن ویتامین‌ها و پروتئین‌ها و رشد میکروبی است. کاهش نمایی در ویژگی‌های کیفی به وسیله سینتیک مرتبه-اول توصیف می‌شود که سرعت واکنش،  $n=1$  است بنابراین می‌توان نوشت؛

$$-\frac{d[Q]}{dt} = k[Q]$$

دوباره از روش جداسازی متغیر استفاده کردتا بتوان از معادله انتگرال گرفت؛

$$-\frac{d[Q]}{[Q]} = kdt$$

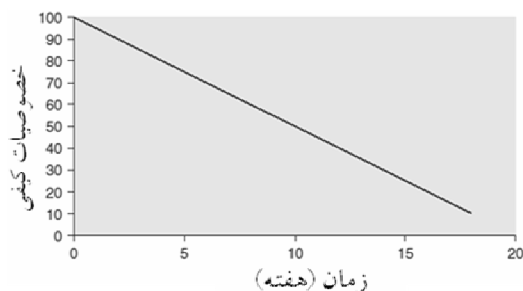
فرض کنید که ویژگی کیفی اولیه برابر  $[Q_i]$  بوده و بعد از زمان  $t$  به  $[Q]$  کاهش می‌یابد، بنابراین؛

### ۷-۱-۱- واکنش مرتبه صفر

در (شکل ۳)، مقادیر اندازه‌گیری شده ویژگی‌های کیفی در زمان‌های مختلف ذخیره‌سازی رسم شده است. این نمودار، خطی است و پیشنهاد می‌کند که سرعت افت کیفیت ویژگی‌های کیفی در کل دوره ثابت باقی می‌ماند. این نوع رفتار در بسیاری از مطالعات عمر ماندگاری مثل تغییرات کیفی به دلیل تخریب آنزیمی و قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی مشاهده شده است. رفتار مشابهی برای اکسایش چربی مشاهده شده است که اغلب به دلیل گسترش طعم تندشدگی می‌باشد.

نمودار خطی در (شکل ۳) نشانگر یک واکنش مرتبه صفر است. بنابراین، اگر  $n=0$  را در معادله قبلی جایگزین کنید، خواهید داشت:

$$-\frac{dQ}{dt} = k$$



شکل ۳- یک کاهش خطی در ویژگی‌های کیفی رسم شده در مقابل زمان

می‌توانید این معادله را با استفاده از روش جدا کردن متغیر برای به دست آوردن یک حل جبری، حل نمایید. فرض کنید مقادیر اولیه ویژگی کیفی به وسیله  $Q_i$  نشان داده شده و بعد از زمان ذخیره‌سازی،  $t$ ، به  $Q$  تبدیل می‌شود. بنابراین؛

$$-\int_{[Q_i]}^{[Q]} d[Q] = k \int_0^t dt$$

انتگرال‌گیری خواهد داشت؛

$$-|[Q]|_{[Q_i]} = kt$$

یا

### 1- Exponential



$$-\int_{[Q]}^{[Q_0]} \frac{d[Q]}{[Q]} = k \int_0^t dt$$

با انتگرال‌گیری خواهید داشت؛

$$-\ln[Q] \Big|_{[Q]}^{[Q_0]} = k|t|_0^t$$

یا

$$\ln[Q_0] - \ln[Q] = kt$$

بنابراین گسترش واکنش، برای واکنش مرتبه-اول به

صورت زیر تعیین می‌شود؛

$$\xi = \ln[Q_0] - \ln[Q]$$

همچنین ممکن است به صورت زیر نوشت؛

$$\ln \frac{[Q]}{[Q_0]} = -kt$$

برای تعیین نسبت تغییر کیفیت بعد از یک دوره

ذخیره‌سازی خاص، معادله فوق را می‌توان به صورت زیر

بازنویسی کرد؛

$$\frac{[Q]}{[Q_0]} = e^{-kt}$$

در این معادله، [Q] مقدار ویژگی کیفی باقی‌مانده بعد از

زمان ذخیره‌سازی t می‌باشد.

اگر [Q<sub>f</sub>] بیانگر مقدار ویژگی کیفی در انتهای عمر

ماندگاری باشد، خواهید داشت؛

$$t_s = \frac{\ln \frac{[Q_0]}{[Q_f]}}{k}$$

اگر می‌خواهید زمان نیمه عمر ویژگی کیفی را بدانید،

می‌توان معادله قبلی را به آسانی تغییر داد. با جایگزین کردن

معادله  $Q_f = 0.5 Q_0$  زیر را به دست می‌آید؛

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k}$$

معادلات مذکور برای پیش‌بینی عمر ماندگاری یک

محصول غذایی یا زمان انقضای از موقعی که محصول

ذخیره‌سازی می‌شود تا زمانی که ویژگی‌های کیفی آن به یک

سطح غیرقابل پذیرش [Q<sub>f</sub>] می‌رسند، مورد استفاده قرار

می‌گیرند. ثابت سرعت (k) واکنش‌های فساد اصلی در مواد

غذایی باید در نظر گرفته شده و یا می‌توان آن‌ها را در هنگام

ارزیابی عمر ماندگاری، تعیین نمود.

اثر شرایط محیطی در طی ذخیره‌سازی محصول با مقدار عددی ثابت سرعت (k) بیان می‌گردد. آشکارترین متغیر محیطی دما بوده و اثر دما روی ثابت سرعت به وسیله معادله آرنیوس بیان می‌گردد:

$$k = Be^{\left(\frac{-E_A}{RT_A}\right)}$$

ثابت انرژی فعال‌سازی (E<sub>A</sub>)، اثر دما روی سرعت

تخریب کیفیت محصول در طی ذخیره‌سازی را تعیین

می‌کند. این معادله ابتدا در هنگام آزمون عمر ماندگاری

تسریع شده استفاده می‌شود که تحت شرایط آزمایشگاهی،

دما را افزایش می‌دهند تا سرعت تخریب محصول افزایش

یابد. این روش‌ها به ما اجازه می‌دهند تا عمر

ماندگاری را در یک دوره زمانی نسبتاً کوتاه (روز یا هفته)

در دمای بالا تعیین کنیم درحالی که عمر ماندگاری واقعی،

ممکن است خیلی طولانی‌تر باشد (۱ تا ۲ سال).

در اکثر مواقع، اثر بسته‌بندی روی عمر ماندگاری

محصول، تابع شاخص‌های محیطی دیگر، علاوه بر

دماست. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، غلظت اکسیژن، بخار

آب، نیتروژن، دی‌اکسیدکربن و شاخص‌های دیگر محیطی

می‌توانند روی واکنش‌های تخریبی مواد غذایی تأثیر

بگذارند. به منظور استفاده از این شاخص‌ها در پیش‌بینی

عمر ماندگاری، نیاز خواهید داشت که اثر این متغیرها

روی ثابت‌های سرعت را بدانید. سپس این روابط اضافی

در ترکیب با عبارت‌های توصیف‌کننده انتقال این مواد از

مانع بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به عنوان مثال یک غلات صبحانه‌ای خشک با اسید

آسکوربیک<sup>۱</sup> (ویتامین C) غنی‌سازی شده است. تخریب

اسید آسکوربیک در طی ذخیره‌سازی غله تابع فعالیت آبی

محصول می‌باشد. بسته مورد استفاده برای غله باید این

اطمینان را حاصل نماید که فعالیت آبی در سطحی پائین،

حفظ می‌شود تا از میزان مطلوب ویتامین C محافظت شود.

1- Ascorbic acid

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون

ب. رابطه داده شده بین فعالیت آبی و ثابت سرعت:

$$2.53 \times 10^{-5} = 2.733 \times 10^{-5} a_w + 1.428 \times 10^{-5}$$

$$a_w = 0.4$$

ج. به منظور تعیین مقدار تغییر رطوبت مورد نیاز برای افزایش فعالیت آبی به  $0/4$ ، فعالیت آبی باید به میزان رطوبت تبدیل گردد. رابطه معمول برای این محصول در محدوده فعالیت آبی بین  $0/1$  و  $0/4$  برابر است با:

$$W = 0.175 a_w + 0.0075$$

با توجه به این روابط، میزان رطوبت محصول در فعالیت آبی  $0/4$  برابر است با:

$$W = 0.175(0.4) + 0.0075 = 0.0775 \text{ or } 7.75\% \text{ (d.b)}$$

د. در طی ۱۴ روز ذخیره‌سازی، میزان رطوبت را می‌توان از  $0/3$  به  $0/7/75$  افزایش داد یا

$$0.0775 - 0.03 = 0.0475 \text{ Kg water/Kg product solids and } 0.02375 \text{ Kg water per package}$$

که برابر میزان رطوبت انتقالی از میان فیلم بسته‌بندی در طی مدت ۱۴ روز می‌باشد. سپس سرعت انتقال برابر می‌شود با:

$$= \frac{0.02375 \text{ Kg water}}{(14 \text{ days})(24 \text{ hr/day})(60 \text{ min/hr})} = 1.178 \times 10^{-6} \text{ Kg water/min}$$

ه. با استفاده از معادله نفوذپذیری خواهید داشت:

$$P_B \frac{(1.178 \times 10^{-6} \text{ Kg water/min})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(60 \text{ s/min})(0.17 \text{ m}^2)(2.5476 - 0.4246 \text{ kPa})(1000 \text{ Pa/kPa})}$$

$$\text{Where: } P_{ws} = 4.246(0.6) = 2.5476$$

$$P_w = 4.246(0.1) = 0.4246$$

$$P_B = 5.44 \times 10^{-14} \text{ Kg m/(m}^2 \text{ Pas)}$$

و. به وسیله تبدیل به واحدهای منطبق با (جدول ۱) خواهید داشت:

$$P_B = 6.44 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ cm/(cm}^2 \text{ s cmHg)}$$

ز. براساس اطلاعات ارائه شده در (جدول ۲)، پلی‌وینیلیدین کلراید<sup>۲</sup> برای فیلم بسته‌بندی مناسب است و اطمینان از عمر ماندگاری مطلوب را حاصل می‌کند.

فعالیت آبی اولیه غلّه برابر  $0/1$ ، و میزان رطوبت آن برابر  $0/3$  (بر مبنای خشک) است. رابطه بین میزان رطوبت محصول و فعالیت آبی به صورت زیر است:

$$W = 0.175 a_w + 0.0075$$

ابعاد بسته  $5 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  بوده و در هر بسته  $0/5 \text{ kg}$  محصول وجود دارد. انتخاب نفوذپذیری فیلم بسته‌بندی، با ضخامت  $1 \text{ mm}$  این اطمینان را می‌دهد که  $0/60$  اسید آسکوربیک بعد از ۱۴ روز ذخیره‌سازی محصول در محیطی با رطوبت نسبی  $0/60$  و دمای  $30^\circ \text{C}$  باقی می‌ماند.

#### داده‌ها

میزان رطوبت اولیه محصول  $(w) = 0/3$  (بر مبنای خشک)

$$\text{فعالیت آبی اولیه محصول} = a_w = 0/1$$

$$\text{رطوبت نسبی محیط ذخیره‌سازی} = 0/60$$

ثابت سرعت تخریب اسید آسکوربیک

$$= 1/70 \times 10^{-9} \text{ (k)/min}$$

عمر ماندگاری مورد انتظار = ۱۴ روز

$$\text{مساحت سطح بسته} = 0/17 \text{ m}^2$$

#### روش

عبارت کلیدی مورد استفاده در حل این مسئله، معادله نفوذپذیری می‌باشد و  $(P_B) = D_B S$ . سرعت تخریب اسید آسکوربیک برای تعیین حداکثر فعالیت آبی مجاز محصول جهت پیشگیری از تخریب بیش از  $0/60$  در مدت ۱۴ روز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با دانستن حداکثر فعالیت آبی مجاز، می‌توانید کل مقدار آبی را که می‌تواند در طی ۱۴ روز ذخیره‌سازی به محصول اضافه شود را تعیین کنید و نفوذپذیری فیلم بسته‌بندی با ضخامت مشخص را تعیین نماییم.

#### حل

الف. برای تعیین ثابت سرعت متوسط<sup>۱</sup> در دوره زمانی عمر ماندگاری محصول خواهید داشت:

$$0.6 = \exp[-(k_{ave})(14 \text{ days})(24 \text{ hr/day})(60 \text{ min/hr})]$$

$$K_{ave} = 2.53 \times 10^{-5} / \text{min}$$

## 2- Polyvinylidene chloride



## 1- Average rate constant

## ۸- نتیجه گیری

## فهرست نشانه‌ها

A	area (m <sup>2</sup> )
a <sub>w</sub>	water activity
B	Arrhenius constant
C	GAB constant
c	concentration (kg/m <sup>3</sup> or kg mole/m <sup>3</sup> )
D	mass diffusivity (m <sup>2</sup> /s)
E <sub>A</sub>	activation energy for temperature (kJ/kg)
E <sub>p</sub>	activation energy for permeability (kcal/mole)
K	GAB constant
k	rate constant for quality change (1/s)
m	mass flux (kg/s)
n	order of reaction
p	partial pressure of gas (kPa)
P	package film permeability
Q	amount of quality attribute
R	gas constant (m <sup>3</sup> Pa/kg mol K)
S	solubility (moles/cm <sup>3</sup> atm)
ξ	extent of reaction
T	temperature (C)
T <sub>A</sub>	absolute temperature (K)
t	time (s)
t <sub>s</sub>	shelf life (s)
t <sub>1/2</sub>	half life (s)
w	moisture content (% d.b.)
w <sub>o</sub>	monolayer moisture content (% d.b.)
x	distance coordinate (m)

نوآوری‌های اخیر در بسته‌بندی مواد و محصولات غذایی در جهت گسترش ایمنی، راحتی، عمر ماندگاری و کیفیت کلی محصولات بوده‌اند. بسته‌بندی‌های جدید فرصت‌هایی را برای پی بردن به تغییرات محصول در طی ذخیره‌سازی، توزیع فراهم کرده و همچنین پتانسل برخورد صحیح با نواقص را بر مبنای ایجاد تغییرات در طراحی فراهم می‌نماید. پیشرفت‌های آینده، بسته‌بندی‌هایی با رضایتمندی بیشتر برای گسترش عمر ماندگاری و بهبود ویژگی‌های کیفی محصولات غذایی فراهم می‌کنند.

تحول علوم در استفاده از مقیاس نانو، این پتانسیل را برای ابداع بسته‌بندی‌های جدید در آینده دارد. نتایج برآمده از تحقیقات انجام شده در مقیاس نانو منجر به تولید موادی (پلی‌مرهایی) با فناوری نانو شده است که دارای ویژگی‌های منحصر به فردی در زمینه محافظت از مواد غذایی از تمامی عوامل زیان‌آور خواهد شد. این مواد، فرصت‌هایی مانند داشتن سطوح ضد میکروبی و پی بردن به فعالیت‌های میکروبیولوژیکی و بیوشیمیایی برای تمامی بسته‌بندی‌ها را به وجود می‌آورند. استفاده از علوم در مقیاس نانو منجر به تولید مواد بسته‌بندی خاصی می‌شود که با تغییرات pH، فشار، دما، و نور و همچنین با دیگر محصولات جانبی حاصل از واکنش‌های رخ داده در درون بسته، خود را هماهنگ می‌نمایند.

## ۹- منابع

1. Brody, A.L. "Modified atomospher packaging". In encyclopedia of agricultural, food and biological engineering, D.R. Heldman. Ed., 666-670. Marcel dekker inc, New York. 2003.
2. De Kruijf, N. and Van Beest, M.D. "Active packaging". In encyclopedia of agricultural, food and biological engineering, D.R.Heldman, ed. 5-9. Marcel Dekker Inc. New York. 2003.
3. Krochta, J.M. "Package permeability". In encyclopedia of agricultural, food and biological engineering, D.R Heldman. Ed. 720-726. Marcel Dekker Inc. New York. 2003.
4. Krochta, J.M. "Food package", In In handbook of food engineering, D.R.Heldman and D.B.Lund, eds.

indicators in monitoring changes in quality attributes of perishable and semiperishable foods". *J. Food Sci.* 53(1): 148-156. 1988b.

17. Yam, K.L., Paik, J.S., and Lai. C.C Food packaging , part 1. general considerations. In encyclopedia of food science & technology, Y.H.Hui, ed. John Wiley & Sons. Inc., New York.

18. Yasuda. H. and Stannett, V. "Permeability coefficients". In polymer handbook, 3<sup>rd</sup>, J. Brandrup and E.H.Immergut, eds. Wiley, New York. 1989.

### آدرس نویسنده

گرگان - میدان بسیج - پردیس دانشگاه -  
تلفکس: ۰۱۷۱-۴۴۲۶۴۳۲

CRC Press taylor& francis group. Boca raton. Florida. 2007.

5. Labuza, T.P. "Shelf-life dating of foods". Food and nutrition press, Westport, Connecticut. 1982.

6. Linssen. J.P.H. and Roozen, J.P. "Food flavour and packaging interactions". In food packaging and preservation, M.Mathlouthi, ed. 48-61. Blackie academic and professional, New York. 1994.

7. March, K.S. "Looking at packaging in a new way to reduce food losses". *Food technology* 55: 48-52. 2001.

8. Robertson. G.L. Food packaging-principles and practice. CRC Press. Taylor& francis group, boca raton. Florida. 2006.

9. Rodrigues, E.T. and Han, J.H. "Intelligent packaging". In encyclopedia of agricultural, food and biological engineering, D.R. Heldman. Ed., 528-535. Marcel Dekker inc., New York. 2003.

10. Shellhammer, T.H. "Flexible packaging". In encyclopedia of agricultural. Food and biological engineering, D.R.Heldman, ed., 333-336. Marcel dekker inc. New York. 2003.

11. Singh. R.P. Scientific principles of shelf- life evaluation. In shelf- life evaluation of foods. C.M.D. Man and A.A.Jones. eds., 3-22. Aspen publication. Maryland. 2000.

12. Steven. M.D. and Hotchkiss, J.H. Package functions. In encyclopedia., 716-719. Marcel dekker inc., New York. 2003.

13. Taoukis. P.S. and Labiza. T.P. "Applicability of time – temperature indicators as food quality monitors under non- isothermal conditions". *J.Food Sci* 54: 783. 1989.

14. Taoukis. P.S. Fu, B., and Labiza. T.P. Time temperature indicators. *Food tech.* 45(10): 70-82. 1991.

15. Wells, J.H. and Singh, R.P. "AKinetic approach to food quality prediction using full – history time – temperature indicators". *J. Food Sci.* 53(6): 1866-1871. 1893. 1988a.

16. Wells, J.H. and Singh. R.P. "Application of time – temperature