

مروری کوتاه بر مدل‌سازی و طراحی بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده برای محصولات تازه

گیسو ملکی^۱، ناصر صداقت^{۲*}، مهدی فرهودی^۳، محبت مجیبی^۴

تاریخ دریافت مقاله: خرداد ماه ۱۳۹۵

تاریخ پذیرش مقاله: مهرماه ۱۳۹۵

چکیده

بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده برای محصولات تازه یک سامانه پویا بوده و متکی بر اصلاح اتمسفر درون بسته می‌باشد که حاصل آن دو فرآیند تنفس محصول و انتقال گازها از میان فیلم بسته‌بندی بوده و منجر به ایجاد اتمسفری با مقدار CO_2 بالاتر و O_2 کمتر می‌گردد. چالش این است که چگونه مدل‌های ریاضی برای نشان دادن تنفس محصول و نفوذپذیری بسته ارائه شود تا طراحی بسته‌بندی، ساده گشته و همچنین در زمان و هزینه طراحی بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده به طور سنتی و آزمون و خطا صرفه‌جویی شود. هدف از این تحقیق، کاربرد مدل ریاضی در طراحی بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده برای محصولات تازه می‌باشد. مدل‌های ریاضی برای تنفس و نفوذپذیری محصول در نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب وارد شده و محاسبه می‌گردند. در این طراحی، می‌توان نرخ تنفس، وابستگی دمایی تنفس و نفوذپذیری را مدل‌سازی کرده و در نهایت فیلم مناسب، وزن بهینه محصول درون بسته، دمای بهینه و مقدار مناسب گازها را مشخص نمود.

۱- مقدمه

استفاده از فیلم‌های بسته‌بندی برای بسته‌بندی محصولات زراعی تازه بسیار مورد توجه قرار گرفته و مزایای مختلفی دارد نظیر: محافظت در مقابل صدمات فیزیکی، رعایت بهداشت، کنترل شرایط نوری و از همه مهم‌تر اصلاح ترکیب گازی بسته می‌باشد. تا کنون اطلاعات گسترده‌ای در مورد بسته‌بندی اتمسفر اصلاح شده (MAP) در دسترس است ولی متأسفانه مطالعات سیستماتیک کافی در مورد اینکه کدام فیلم بسته‌بندی تجاری موجود، مناسب برای بسته‌بندی هر کدام از محصولات می‌باشد در دسترس نیست [۱].

هدف طراحی (MAP) تعیین شرایطی است که اتمسفری ایجاد نماید که برای افزایش زمان ماندگاری محصول مناسب بوده و زمان رسیدن به این اتمسفر را به

واژه‌های کلیدی

بسته‌بندی اتمسفر اصلاح شده (MAP) محصولات تازه، طراحی، مدل‌سازی، نرخ تنفس، نفوذپذیری

۱- دانشجوی دکترا گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (May.maleki27@yahoo.com).

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (* نویسنده مسئول: sedaghat@um.ac.ir).

۳- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. (Farhoodi@sbmu.ac.ir).

۴- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد (M-mohebbi@um.ac.ir).

5- Modified Atmosphere Packaging

می شود و بین ۴ تا ۹ می باشد. عامل دوم نوع ماده بسته بندی و نفوذ پذیری آن نسبت به O_2 و CO_2 می باشد. نفوذ پذیری نیز با دما تغییر می کند [۴].

عامل دیگر، بهترین اتمسفر مورد نیاز برای افزایش زمان ماندگاری محصول است که از محصولی به محصول دیگر متفاوت بوده و چالش واقعی این است که چگونه به این اتمسفر برای یک محصول و شرایط بسته بندی خاص برسیم. مدل های ریاضی مختلفی برای توضیح اثر اکسیژن و دی اکسید کربن روی فرآیند تنفس بیان شده اند [۵]. برخی از آن ها مدل های تجربی (خطی، درجه دوم، نمایی) هستند، در حالی که بیشترین مدل مورد استفاده یک مدل شبه بنیادی بر اساس کینتیک^۵ آنزیمی میکائلیز-منتن^۶ می باشد. محققین مطالعات گسترده ای روی روش های مورد استفاده در تعیین و مدل سازی فرآیند تنفس میوه های تازه و سبزی ها انجام داده اند [۱].

در فرآیند مدل سازی تنفس و طراحی (MAP) با معادلات دیفرانسیلی متعددی روبرو خواهیم بود که به صورت آنالیتیکی^۷ قابل حل نبوده و می توان از نرم افزارهای مختلفی جهت محاسبه آن ها استفاده نمود (از جمله نرم افزار متلب^۸). روش آدامز-مولتون^۹ توسط برخی محققان مورد استفاده قرار گرفت تا به صورت عددی از معادلات دیفرانسیلی انتگرال^{۱۰} گرفته و محیط گازی درون کیسه های نفوذ پذیر حاوی سیب و سالاد سبزیجات آماده را شبیه سازی نمایند [۶]. همان روش عددی توسط برخی دیگر استفاده گردید تا همزمان تغییر ترکیب گازی،^{۱۱} (RH) و دما در بسته های مدل با محصولات تازه پیش بینی شود [۷]. معادلات دیفرانسیلی به صورت عددی در نرم افزار^{۱۲} (SAS) محاسبه شده است

حداقل برسانند. اگر سامانه (MAP) به درستی طراحی نشود باعث کم شدن عمر انبارمانی محصول می گردد. به عنوان مثال ممکن است باعث ایجاد شرایط بی هوازی، رشد میکروب های بیماریزا و ایجاد ترکیبات آلوده کننده شود که همگی در کاهش عمر نگهداری محصول دخیل هستند [۲].

موفقیت (MAP) بستگی به انتخاب ماده بسته بندی، ضخامت، سطح بسته و حجم آزاد درون بسته دارد. آن ها نیز به شدت تنفس محصول، وزن محصول بسته بندی شده و دمای زنجیره توزیع وابسته هستند. شبیه سازی یک سامانه (MAP) مناسب ترین روش است که منجر به طراحی (MAP) صحیح و در نتیجه رسیدن به یک محصول تجاری موفق می شود. روش (MAP) سنتی عواقب ایمنی و اقتصادی داشته و روش آزمون و خطا بسیار زمان بر است. برای رسیدن به اتمسفر بهینه درون بسته، می توان غلظت O_2 و CO_2 را برای فیلم ها، سطح ها و وزن های مختلف بدون آزمایشات وقت گیر شبیه سازی کرده تا بهترین فیلم برای بسته بندی هر نوع محصول تعیین شود. در این فرآیند، همچنین عواملی نظیر شدت تنفس، دما، فیلم بسته بندی، سطح، وزن محصول، شکل هندسی بسته و حجم آن مورد توجه قرار می گیرند [۳].

اولین و مهم ترین مورد در مدل سازی و طراحی (MAP) مدل سازی شدت تنفس است. مدل ریاضی برای سرعت تنفس معمولاً تابعی از O_2 ، CO_2 و دما است. نسبت بین سرعت تولید CO_2 و سرعت مصرف O_2 کسر تنفسی^۱ (RQ) است که بین ۰/۷ تا ۱/۳ می باشد و هنگامی که تنفس به سمت بی هوازی سوق پیدا می کند این نسبت بالاتر از ۱ می شود. به دلیل فرآیند تنفس، گرادیان^۲ غلظت O_2 و CO_2 بین فضای خالی بسته^۳ و محیط به وجود می آید. بنابراین به دلیل نفوذ پذیری فیلم بسته بندی به O_2 و CO_2 جریان گازی از میان ماده بسته بندی اتفاق می افتد. نسبت بین نفوذ پذیری به CO_2 و نفوذ پذیری به O_2 به عنوان نفوذگزینی^۴ (β) شناخته

5- Kinetic

6- Michaelis-Menten

7- Analytical

8- Matlab

9- Adams-Moulton

10- Differential Calculus

11- Gas Concentration

12- Software SAS

1- Respiration Quotient

2- Gradient

3- Headspace

4- Selectivity

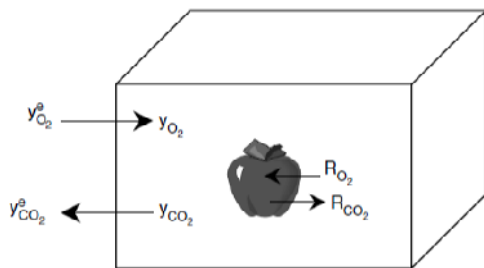
حاوی یک محصول تنفس کننده به صورت ذیل هستند (متعادل شده با N₂) [۱۴]:

معادله (۱)

$$V_f \times \frac{d(y_{CO_2})}{dt} = \frac{P_{CO_2}}{e} \times A \times (y_{CO_2}^e - y_{CO_2}) + R_{CO_2} \times M$$

معادله (۲)

$$V_f \times \frac{d(y_{O_2})}{dt} = \frac{P_{O_2}}{e} \times A \times (y_{O_2}^e - y_{O_2}) - R_{O_2} \times M$$



شکل ۱- مکانیزم تبادل گاز در بسته MA حاوی

محصول تازه [۱۵]

معادلات (۱ و ۲) معادلات دیفرانسیلی خطی نوع اول

هستند که برای توضیح رفتار حالت ناپایا^۵ سامانه (MAP)

در طول فرآیند غیرفعال، مناسب می باشند. هنگامی که حد

این معادلات به سمت صفر میل می کند، معادلات (۱ و ۲)

به حالت پایا^۶ تغییر می یابند:

معادله (۳)

$$y_{O_2}^e = y_{O_2} + \frac{R_{O_2} \times e \times M}{P_{O_2} \times A}$$

معادله (۴)

$$y_{CO_2}^e = y_{CO_2} - \frac{R_{CO_2} \times e \times M}{P_{CO_2} \times A}$$

5- Unsteady-State

6- Steady-State

تا ترکیب گازی را در بسته های از جنس پلی اتیلن با دانسیته کم (LDPE) و حاوی کاسنی فرنگی پیش بینی شود. یکی از پر استفاده ترین روش هایی که گزارش شده است روش رانگ- گوتا^۸ نوع چهارم می باشد [۸ و ۱۰].

مطالعات گسترده ای در مورد مدل سازی و طراحی (MAP) انجام شده است. در این زمینه، انواع میوه ها و سبزی ها مورد مطالعه قرار گرفته اند از جمله: کاهو، فلفل دلمه ای و خیار خرد شده [۱۱]، کاسنی فرنگی [۱۲]، سیب رقم آنورکا [۴]، قارچ [۳]، انار [۱۳]، آناناس برش خورده [۱۴] و توت فرنگی [۱۵].

هم اکنون اطلاعات کافی در مورد جنبه های مختلف (MAP) محصولات تازه تحت شرایط محیطی ثابت گردآوری شده است. با استفاده از مدل های ریاضی فاز تولید (MAP) کوتاه تر خواهد شد، چرا که روش های آزمون و خطای سنتی بسیار زمان بر هستند. هدف اصلی این مقاله، ارائه اطلاعات گزارش شده در مطالعات پیشین در مورد مدل سازی ریاضی تنفس و (MAP) جهت محصولات تازه می باشد که طراحی را تسهیل نموده و به تولیدکننده گزینه های مختلفی از جمله نوع فیلم بسته بندی، اندازه بسته و مقدار محصول پیشنهاد می نماید که در نهایت منجر به تولید بسته ای مناسب طی مدت زمانی کمتر می گردد.

۲- روش طراحی

شکل (۱) به طور شماتیک یک محصول تنفس کننده

بسته بندی شده درون یک فیلم پلاستیکی را نشان می دهد.

ساده ترین مفهوم، این است که به فیلم پلاستیکی اجازه دهیم

تا مثل یک تنظیم کننده جریان O₂ به داخل و جریان CO₂ به

خارج عمل کند. با فرض اینکه هیچگونه لایه بندی^۳ گاز

درون بسته نیست و فشار کل ثابت است، معادلات

دیفرانسیلی تعادلی جرم برای O₂ و CO₂ در یک بسته^۴ MA

1- Low Density Polyethylene

2- Runge-Kutta

3- Stratification

4- Modified Atmosphere

ماندگاری مورد نیاز است تا بتوان محاسبات ریاضی را انجام داد.

جدول ۱- متغیرهایی که در طراحی (MAP) مورد

استفاده قرار می گیرند		
$y_{CO_2}^e, y_{O_2}^e$	مربوط به محیط	متغیرهای ورودی
e, A	مربوط به بسته بندی	
M	مربوط به محصول	
P_{CO_2}, P_{O_2}	مربوط به بسته بندی	متغیرهای محاسبه
R_{CO_2}, R_{O_2}	مربوط به محصول	شده
y_{CO_2}, y_{O_2}	مربوط به سامانه	متغیرهای پاسخ ^۱

1- Response Variables

چنین داده‌هایی به طور گسترده در مطالعات پیشین وجود دارند. برای نرم افزار موجود پایگاه داده‌ای تهیه می‌شود که شامل تمام این شاخص‌ها می‌باشد. این پایگاه داده‌ها انعطاف پذیر است به گونه‌ای که کاربر می‌تواند بسته به نیازمندی‌هایش آن را تغییر دهد.

۳-۱- شدت تنفس

کنترل شدت تنفس یک اثر مهم اصلاح اتمسفر بر زندگی پس از برداشت میوه‌ها و سبزی‌ها است به طوری که شدت بالای تنفس همراه با تخریب سریع محصول می‌باشد. طراحی یک سامانه (MAP) که نگهداری یا انبارمانی محصولات تازه را افزایش می‌دهد احتیاج به معادلات ریاضی دارد تا شدت تنفس در عوامل مؤثر مختلف پیش‌بینی شود. بنابراین مدل تنفس در رأس طراحی بسته برای میوه‌ها و سبزی‌های تازه قرار می‌گیرد [۱۶].

۳-۲- مدل سازی ریاضی شدت تنفس

محدودیت‌های متعددی در ایجاد مدل‌های پیشگویانه^۲ وجود دارد. خطاهای آزمایشی بزرگ، آزمایشات وقت گیر برای تعیین شدت تنفس طراحی (MAP) و همچنین

معادلات بالا رفتار دینامیک^۱ تعادلی سامانه (MAP) را نشان می‌دهند، در حالی که میزان تولید CO_2 برابر با میزان خروج آن از بسته و میزان مصرف O_2 برابر با ورود آن به بسته می‌باشد. در بسیاری از شرایط، بسته‌های تجاری ظرف دو روز به حالت پایا یا دینامیک تعادلی می‌رسند. برای نگهداری محصول به مدت طولانی‌تر، رفتار دینامیک تعادلی مهم‌تر از رفتار ناپایا است. برای استفاده از معادلات (۳ و ۴) به عنوان معادلات طراحی لازم است بدانیم که چه تعداد متغیرهای مستقل یا طراحی موجود هستند. جدول (۱) نشان می‌دهد که به طور کلی ۱۱ متغیر وجود دارد: R_{CO_2}, R_{O_2} و M مربوط به محصول؛ P_{CO_2}, P_{O_2} و e و A مربوط به بسته؛ و $y_{CO_2}^e, y_{O_2}^e, y_{CO_2}, y_{O_2}$ مربوط به محیط می‌باشند. هنگامی که محصول و دما انتخاب می‌شوند، شش تا از ۱۱ متغیر مشخص می‌گردند: R_{CO_2} و R_{O_2} از مدل تنفس که در پیشینه تحقیق گزارش شده است؛ فرض می‌شود که y_{CO_2} و y_{O_2} که غلظت‌های بهینه O_2 و CO_2 باشند و $y_{CO_2}^e$ و $y_{O_2}^e$ ثابت هستند به عنوان مثال 0.21 atm و 0.03 atm با شش متغیر مشخص و دو معادله، فقط سه متغیر طراحی باقی می‌ماند. به این معنی که فقط سه تا از پنج متغیر باقی مانده (M, e, A, P_{CO_2} و P_{O_2}) به طور دلخواه تشخیص داده می‌شوند. با تلفیق معادلات (۳ و ۴) معادله زیر به دست می‌آید:

$$\text{معادله (۵)} \quad \frac{y_{CO_2}^e - y_{CO_2}}{y_{O_2}^e - y_{O_2}} = - \frac{RQ}{\beta}$$

RQ کسر تنفسی (نسبت بین سرعت تولید CO_2 و سرعت مصرف O_2) و β نسبت نفوذگزی (نسبت بین نفوذپذیری به CO_2 و نفوذپذیری به O_2) می‌باشد.

۳-۳- جنبه‌های مربوط به محصول

برای طراحی هر بسته، خصوصیات محصول نظیر: وزن، شدت تنفس، دانسیته و شرایط بهینه برای بهترین زمان

2- Predictive

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون
بسته بندی

1- Dynamic

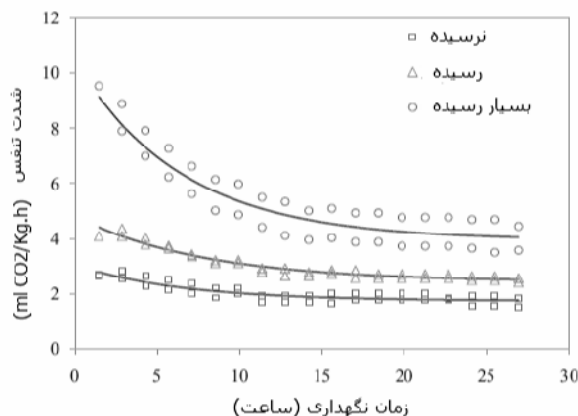
طبیعت پیچیده فرآیند از جمله این محدودیت‌ها می‌باشند. بنابراین یک شدت تنفس ثابت در مدل‌سازی (MAP) در نظر گرفته می‌شود که در مطالعات پیشین ذکر شده است [۱۷]. با این وجود، این روش می‌تواند تنها به عنوان یک مدل ساده شده قبول شود که در واقع (MAP) متکی به توانایی کنترل شدت تنفس با تغییر ترکیب گازی اتمسفر است. بنابراین طراحی نه تنها باید شرایط پایا، بلکه باید فرآیند پویا را نیز مورد توجه قرار دهد زیرا اگر محصول برای مدت طولانی در معرض ترکیب گازی نامناسب قرار گیرد قبل از رسیدن به اتمسفر مناسب، ممکن است خراب شده و بسته هیچ سودی نداشته باشد.

علاوه بر این، موفقیت (MAP) بسیار به دقت و صحت مدل‌های شدت تنفس پیشگویانه بستگی دارد. میوه‌ها و سبزی‌های ذکر شده در (جدول ۲) بر اساس شدت تنفس موجود در مطالعات پیشین انتخاب شده‌اند. این مدل‌ها تابعی از O_2 ، CO_2 ، دما و وزن یا تلفیقی از آن‌ها می‌باشند. تمام مدل‌ها اصلاح شده‌اند تا به واحدهای یکنواختی از شدت تنفس نظیر: $m^3.kg^{-1}.S^{-1}$ برسیم. شدت تنفس هر میوه یا سبزی در $5^{\circ}C$ در هوا محاسبه شده است.

جدول ۲- نرخ تنفس پیش‌بینی شده میوه‌ها و سبزی‌ها توسط مدل‌های ذکر شده در مطالعات پیشین [۱۹]

شدت تنفس				شدت تنفس					
RQ	MI of CO_2/kg hr	MI of O_2/kg hr	منبع	محصول	RQ	MI of CO_2/kg hr	MI of O_2/kg hr	منبع	محصول
۰/۹۳	۵۲/۶۷	۵۶/۶۳	۴	کاسنی					سیب:
۰/۶۸	۱۶/۵۲	۲۴/۳۹	۱۳	خیار	۰/۸۶	۱۵/۲۱	۱۷/۶۸	۴	واریته الستار ^۱
۰/۹۴	۱۱۳/۵۳	۱۲۰/۷۷	۴	بروکلی	۱/۰۱	۱۷/۱۰	۱۶/۹۷	۵	واریته رد دلشیز ^۲
۰/۸۹	۲۰۰/۸۲	۲۲۵/۶۲	۱۳	بروکلی خرد شده	۰/۸۶	۱۰/۷۶	۱۲/۵۱	۴	واریته گلدن دلشیز ^۳
۱/۶۶	۳/۶۸	۲/۲۱	۱۳	فلفل خرد شده	۱/۲۳	۱۰/۳۱	۸/۴۲	۷	واریته دلشیز ^۴
۰/۷۴	۲۳/۴۶	۳۱/۵۳	۱۳	سیر					واریته رد دلشیز
۰/۷۴	۲۴/۶۵	۳۳/۴۳	۱۳	سیر پوست کنده	۰/۶۲	۵/۵۶	۸/۹۱	۸	خرد شده
۰/۸۰	۴۰/۹۷	۵۰/۹۲	۱۳	پیاز	۰/۸۷	۳۶/۳۳	۴۱/۷۶	۹	مارچوبه
۰/۵۲	۵/۷۸	۱۱/۱۱	۱۳	پیاز خرد شده	۱/۰۶	۱۵/۰۱	۱۴/۱۴	۱۰	موز
۰/۸۳	۱۱/۶۰	۱۳/۹۰	۲۲	لیتچی	۰/۹۱	۱۱/۱۵	۱۲/۲۸	۱۱	فلفل دلمه ای
۰/۹۲	۱۷/۷۴	۱۹/۲۸	۲۵	انبه					تمشک آبی:
۱/۲۸	۱۰۰۵/۹۵	۷۸۷/۸۶	۲۴	انبه خرد شده	۰/۷۹	۲۰۴/۷۳	۲۵۹/۰۸	۱۲	واریته بلوری ^۵
۰/۹۰	۱۰۶/۳۴	۱۱۸/۳۶	۹	قارچ	۰/۷۹	۲۹۰/۱۶	۳۶۵/۶۲	۱۲	واریته کاویل ^۶
۱/۱۲	۴۸/۶۳	۴۳/۴۶	۲۷	تمشک	۰/۸۰	۹۰/۰۵	۱۱۲/۵۶	۱۵	کلم
۰/۹۳	۱۴/۰۹	۱۵/۱۵	۲۵	فلفل قرمز	۰/۵۶	۱۴/۵۸	۲۶/۰۵	۱۳	هویج
۰/۲۸	۱۴/۲۲	۵۰/۵۲	۱۳	سویا	۱/۴۲	۱۳/۸۸	۹/۸۰	۱۶	گل کلم
۰/۸۴	۱۸/۱۱	۲۱/۶۲	۳۰	توت فرنگی	۰/۹۲	۳۳/۷۳	۳۷/۶۶	۱۷	گیلاس
۰/۵۱	۱۸/۳۰	۳۶/۰۱	۳۲	گوجه فرنگی	۰/۹۳	۶/۶۳	۷/۱۳	۱۹	کاهوی خرد شده

1. Var. Elstar, 2. Var. Red Delicious, 3. Var. Golden Delicious, 4. Var. Delicious, 5. Var. Blue Berry, 6. Var. Coville



شکل ۲- تغییرات شدت تنفس آناناس برش خورده تابعی از زمان و عمر فیزیولوژیکی میوه [۱۴]

این پدیده شامل کاهش تولید یا عملکرد C_2H_4 ، کاهش تعداد و میزان ضررهای بیولوژیکی، حفظ کیفیت و رنگ، بافت و طعم بهتر می‌باشد. معمولاً مهم‌ترین آن‌ها انتخاب شده که به معنی عاملی است که عمر انبارمانی را محدود می‌کند.

پیشنهادات در طول سال‌ها و با معرفی داده‌های جدید به روز رسانی شده‌اند. گستره ترکیب گازی که بیشترین افزایش عمر انبارمانی محصول را سبب می‌شود معمولاً "پنجره"^۴ اتمسفر پیشنهادی نامیده می‌شود. با این وجود، افزایش عمر انبارمانی محصول با استفاده از O_2 پایین و CO_2 بالا برای تمام محصولات مناسب نیست. به عنوان مثال سطوح پایین O_2 برای برخی سبزی‌ها نظیر: مارچوبه و بامیه مناسب نمی‌باشد.

تفاوت‌های زیادی در مقاومت به میزان CO_2 وجود دارد. در حالی که اکثر میوه‌ها ممکن است تا ۵٪ CO_2 را تحمل کنند، برخی دیگر در این مقدار CO_2 آسیب دیده و برخی هم تا ۲۰-۱۵٪ CO_2 را نیز تحمل می‌کنند. اتمسفرهای پیشنهادی برای میوه‌ها و سبزی‌ها در (شکل‌های ۳ و ۴) نشان داده شده‌اند [۱۹].

فینگان و همکاران^۱ شدت تنفس آناناس برش خورده و نفوذپذیری نسبت به گاز را برای بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده مدل‌سازی نمودند. همانطور که در (شکل ۲) مشاهده می‌شود، فعالیت تنفسی آناناس برش خورده در ابتدا بسیار بالا بوده و در نهایت با سرعت کمتری به مقدار تعادلی کاهش می‌یابد. شدت بالای اولیه به دلیل برش و پاسخ به استرس می‌باشد. همانطور که قبلاً گزارش شده است R_{CO_2} هویج خرد شده در طول ۳۱ ساعت از ۸/۶ به ۳/۶ رسیده است [۱۸].

مدل ریاضی جهت پیش‌بینی تغییرات شدت تنفس با گذشت زمان برای شاخص‌های تأثیرگذار درونی و بیرونی به کار گرفته شد. نتایج نشان دادند که این مدل جهت پیش‌بینی ترکیب گازی مناسب درون بسته و تخمین OTR ^۲ و CTR ^۳ بسته حاوی آناناس برش خورده مناسب بوده است.

۳-۳- محصولات و شرایط بهینه آن‌ها

بهترین اتمسفر برای افزایش عمر انبارمانی محصول از محصولی به محصول دیگر متفاوت است و به دما بستگی دارد. غلظت‌های پیشنهادی نیز به عامل کیفیت تحت اندازه‌گیری بستگی دارند.

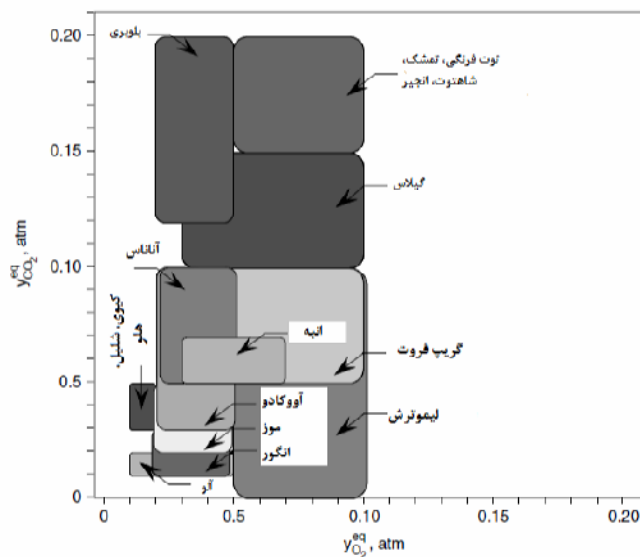
- 1- Finnegan
- 2- O_2 Transmition Rate
- 3- CO_2 Transmition Rate

4- Window

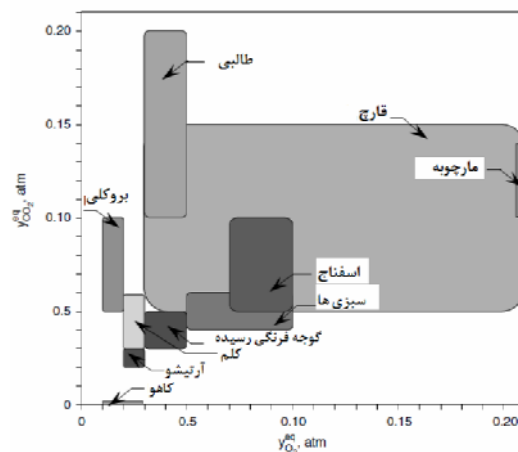
۳-۴- محاسبه مقدار β

انتخاب فیلمی که β بهینه دارد برای رسیدن به اتمسفر بهینه در بسته ضروری است. استفاده از یک فیلم پلیمری با β بالا (مثلاً ۶-۴) منجر به ایجاد یک اتمسفر تعادلی با CO_2 پایین شده و فیلمی با β پایین (مثلاً < 2) تمایل به تجمع مقادیر بالای CO_2 دارد. معادله (۵) نشان می‌دهد (برای یک محصول با RQ مشخص) که یک بسته مشخص فقط

می‌تواند ترکیب محدودی از غلظت‌های O_2 و CO_2 را تولید کند که با سرعت انتقال نسبی CO_2 به O_2 کنترل می‌شود. بنابراین انتخاب ماده بسته‌بندی اساساً بر پایه انتخاب یک ماده با یک نسبت نفوذگزینی است که به آن اجازه می‌دهد تا به ترکیب اتمسفری مناسب در حالت پایا برسد. این امر به محاسبه مقادیر β اضافی مناسب برای محصول انتخاب شده احتیاج داشته و می‌تواند با حل معادله (۵) در سطوح حداقل و حداکثر O_2 و CO_2 به صورت زیر به دست آید:



شکل ۳- اتمسفر پیشنهادی برای میوه‌های تازه (مربع‌ها یا پنجره‌ها اتمسفر پیشنهادی برای هر میوه را نشان می‌دهد) [۱۹]



شکل ۴- اتمسفر پیشنهادی برای سبزی‌های تازه (مربع‌ها یا پنجره‌ها اتمسفر پیشنهادی برای هر میوه را نشان می‌دهد) [۱۹]

۴- سامانه‌های بسته‌بندی

از آنجایی که انواع محصولات وجود دارد، گستره وسیعی از نفوذپذیری مورد نیاز است. نفوذپذیری بالا برای محصول سریع تنفس‌کننده و نفوذپذیری پایین برای محصول کند تنفس‌کننده لازم است. نفوذپذیری لازم ممکن است با سه نوع سامانه بسته‌بندی مختلف به دست آید:

(۱) فیلم‌های پلیمری بدون منفذ

(۲) فیلم‌های پلیمری میکروپرفوریتد^۲

(۳) سامانه‌های بسته‌بندی پرفوریشن-مدی ایتد^۳

جزئیات هر سامانه در (شکل ۵) نشان داده شده است. فیلم‌های پلیمری بدون منفذ منجر به غلظت‌های پایین O_2 و CO_2 می‌شود زیرا نفوذپذیری CO_2 این مواد معمولاً ۳-۶ برابر نفوذپذیری به O_2 آن‌ها بوده و برای محصولاتی مناسب هستند که مقاومت کمتری به CO_2 دارند نظیر: انبه، موز، انگور و سیب‌ها. فیلم‌های میکروپرفوریتد میزان نفوذپذیری بالاتری دارند ولی نسبت نفوذگزینی O_2 به CO_2 بسیار پایین‌تر است. بنابراین چنین فیلم‌هایی بسیار مناسب برای محصولاتی هستند که همزمان مقاوم به O_2 کم و CO_2 بالا هستند، نظیر محصولات تازه برش خورده، توت فرنگی و قارچ. بسته‌بندی پرفوریشن-مدی ایتد سامانه‌ای است که لوله‌ها (که ممکن است با یک پرکننده ختنی بسته شوند) وارد یک بسته غیرقابل نفوذ می‌شوند. این سامانه نیز مناسب برای محصولاتی است که مقدار پایین O_2 و مقدار بالای CO_2 احتیاج دارند و تجمع آب درون بسته را به حداقل می‌رساند و چون بسته سفت است برای محصولات حجیم و محصولات حساس به آسیب‌های مکانیکی مناسب می‌باشد [۲۱].

$$\beta_{\min} = RQ_B \left(\frac{y_{O_2}^e - y_{O_2}^{\max}}{y_{CO_2}^{\max} - y_{CO_2}^e} \right) \quad \text{معادله (۶)}$$

$$\beta_{\max} = RQ_A \left(\frac{y_{O_2}^e - y_{O_2}^{\min}}{y_{CO_2}^{\min} - y_{CO_2}^e} \right) \quad \text{معادله (۷)}$$

$$\beta_{\text{mean}} = \frac{\beta_{\min} + \beta_{\max}}{2} \quad \text{معادله (۸)}$$

کسرهای تنفسی (RQs) در گوشه‌های پایین سمت چپ و بالا سمت راست "پنجره بهینه" از ترکیب گازی پیشنهادی محاسبه می‌شوند (به عنوان مثال برای کمترین غلظت O_2 و CO_2 و برای بالاترین غلظت O_2 و CO_2). این محاسبات برای دمای مشخص شده توسط کاربر انجام می‌شود و مدل بر اساس محصول انتخابی تعیین می‌گردد. برای تعیین محدوده RQ توسط معادلات (۶ و ۷) شدت تنفس در گوشه‌های پایین سمت چپ و بالا سمت راست "پنجره بهینه" به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۰].

$$R_{O_2}^A = \text{model}(y_{O_2}^{\min}, y_{CO_2}^{\min}, T) \quad \text{معادله (۹)}$$

$$R_{CO_2}^A = \text{model}(y_{O_2}^{\min}, y_{CO_2}^{\min}, T) \quad \text{معادله (۱۰)}$$

$$R_{O_2}^B = \text{model}(y_{O_2}^{\max}, y_{CO_2}^{\max}, T)$$

$$R_{CO_2}^B = \text{model}(y_{O_2}^{\max}, y_{CO_2}^{\max}, T) \quad \text{معادله (۱۱)}$$

$$RQ_B = \frac{R_{CO_2}^B}{R_{O_2}^B} \quad \text{معادله (۱۲)}$$

$$R_{O_2}^A = \text{model}(y_{O_2}^{\min}, y_{CO_2}^{\min}, T) \quad \text{معادله (۱۳)}$$

$$R_{CO_2}^A = \text{model}(y_{O_2}^{\min}, y_{CO_2}^{\min}, T)$$

$$R_{O_2}^B = \text{model}(y_{O_2}^{\max}, y_{CO_2}^{\max}, T) \quad \text{معادله (۱۴)}$$

$$R_{CO_2}^B = \text{model}(y_{O_2}^{\max}, y_{CO_2}^{\max}, T)$$

$$RQ_B = \frac{R_{CO_2}^B}{R_{O_2}^B}$$

$$RQ_A = \frac{R_{CO_2}^A}{R_{O_2}^A}$$

2- Micro Perforated

3- Perforation-Mediated

1- Optimum Window

۹۲/۹-۲۹/۰ KJ/mol متغیر است [۵] و برای میوه‌های آماده مصرف ۲۲۰-۶۷ KJ/mol می‌باشد [۱۱].

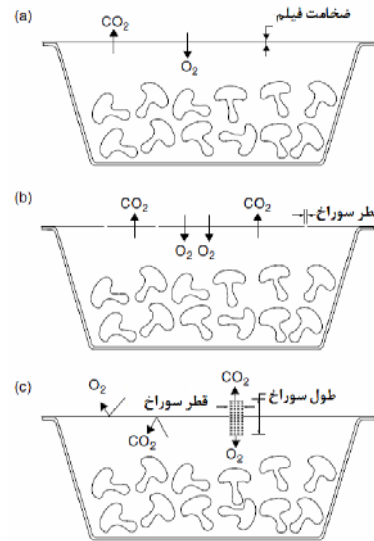
برای طراحی یک (MAP) برای محصول تازه، انرژی فعال‌سازی فرآیند تنفس باید با انرژی فعال‌سازی فرآیند نفوذ مقایسه شود. انرژی فعال‌سازی بیشتر فیلم‌های نفوذپذیر مورد استفاده در بسته‌بندی غذایی ۴۰-۲۰ KJ/mol بوده و بدیهی است که نوسان دما برای ترکیب اتمسفر بسته و زمان ماندگاری محصول بسیار ضروری می‌باشد. بنابراین به یک مدل ریاضی احتیاج است تا تغییرات نفوذپذیری را در شرایط نوسان دمایی پیش‌بینی نمود:

$$P_{O_2,CO_2} = P_{ref} e^{(-E_a/R[(1/T)-(1/T_{ref})])} \quad (16)$$

دمای مرجع (T_{ref}) می‌باشد. P_{O_2,CO_2} نفوذپذیری در دمای T ، P_{ref} نفوذپذیری در

تأثیر نوسانات دما روی سرعت تنفس و نفوذ پذیری گاز فیلم بسته‌بندی حاوی محصولات تازه مدل‌سازی شد تا یک اتمسفر اصلاح شده تعادلی^۶ (EMA) برای محصولات تازه و در معرض تغییرات دما طراحی شود [۱۱].

این محققان گزارش کردند که با سامانه بسته‌بندی پیشنهاد شده در گستره دمایی ۱۰-۲۰°C ترکیب گازی درون بسته (۰.۳٪) و همزمان بالای سطح O_2 مورد نیاز بود. بالعکس در دمای بالاتر (۱۵-۱۲°C) اتمسفر تمایل دارد به سمت کاهش اکسیژن^۷ پیش رود. طبق گزارشات قبلی برای اینکه یک فیلم بسته‌بندی تحت نوسانات دمایی مناسب و کاربردی باشد، تغییر در نفوذپذیری آن نسبت به O_2 و CO_2 باید تغییر در سرعت تنفس محصول حاصل از تغییرات دمایی را جبران نماید [۲۳]. در واقع شرایط گازی پایدار دمایی^۸ درون بسته هنگامی اتفاق می‌افتد که نفوذپذیری فیلم با سرعت



شکل ۵- تنفس شماتیک سه سامانه بسته‌بندی (a) (MAP) با فیلم پلیمری، (b) (MAP) با فیلم پلیمری میکروپرفوریتد، (c) پرفوریشن-مدی ایتد (MAP)

۵- وابستگی دمایی شدت تنفس و نفوذ پذیری

دما یکی از عوامل کلیدی در میزان تنفس و بنابراین زمان ماندگاری محصول است [۲۰ و ۲۲]. اگر چه تغییرات دما تقریباً روی تمام مواد غذایی اثرگذار است، میوه‌ها و سبزی‌ها به نوسانات دما در طول نگهداری بسیار حساس هستند. اخیراً مدلی که بیشترین استفاده را در کمی‌سازی اثر دما بر سرعت تنفس داشته است، مدل آرنیوس^۱ می‌باشد:

$$R_{O_2,CO_2} = R_{ref} e^{(-E_a/R[(1/T)-(1/T_{ref})])} \quad (15)$$

که^۲ R_{ref} سرعت تنفس در دمای مرجع^۳ (T_{ref})،^۴ E_a انرژی فعال‌سازی و R ثابت گازها هستند.

مدل آرنیوس همچنین برای تفسیر اثر دما روی شاخص‌های میکائلیز-منتن استفاده شده است. مقادیر انرژی فعال‌سازی برای میوه‌ها و سبزی‌های معمول از

- 1- Arrhinuse Model
- 2- Reference Respiration Rate
- 3- Reference Temperature
- 4- Activation Energy
- 5- Gas Constant

- 6- Equilibrium Modified Atmosphere
- 7- Hypoxic
- 8- Temp-Stable

۶- نتیجه گیری

استفاده از مدل سازی ریاضی برای محصول و بسته توسط نرم افزار متلب به کاربر این اجازه را می دهد تا بسته بندی مناسب را جهت رسیدن هرچه سریع تر به اتمسفر اصلاح شده (MAP) با O_2 و CO_2 بهینه برای محصول انتخاب نماید. در نتیجه می توان مدت ماندگاری محصول را نیز تعیین نمود. از آنجایی که شدت تنفس و نفوذپذیری تابعی از دما هستند، همچنین می توان با تلفیقی از مدل های مرتبط به مناسب ترین بسته در دماهای مختلف زنجیره توزیع رسید. این روش می تواند به صنعت تولید محصولات تازه کمک نماید تا برای هر محصول، بسته ای مناسب با اتمسفر اصلاح شده و بدون نیاز به زمان و هزینه بالا طراحی نمایند. این فرآیند طراحی قابل تعمیم به تمام محصولات تازه و حتی برش خورده بوده و البته مطالعات گسترده ای نیاز است تا برای هر محصول و ارقام مختلف بتوان یک (MAP) مناسب طراحی نمود.

۷- منابع

1. Montanez, J. C., Rodríguez F.A.S., Mahajan, P.V., Frías, J.M. (2010). "Modelling the effect of gas composition on the gas exchange rate in Perforation-Mediated modified atmosphere packaging." Journal of food engineering 96, 348-355.
2. Paul, D.R. & Clarke, R., (2002). "Modeling of modified atmosphere packaging based on designs with a membrane and perforations." Journal of membrane science, 208, 269-283.
3. Oliveira, F., Sousa-Gallagher, M.J., Mahajan, P.V. & Teixeira, J.A., (2012). "Development of shelf-life kinetic model for modified atmosphere packaging of fresh sliced mushrooms." Journal of food engineering, 111, 466-473
4. Torrieri, E., Cavella, S. & Masi, P., (2009). "Modelling the

تنفس معمول بسته بندی شده تطابق داشته باشد. در حالی که شدت تنفس نسبت به نفوذپذیری بیشتر تحت تأثیر نوسان دمایی قرار می گیرد، اگر محصول بسته بندی شده تحت شرایط دمایی مختلف نگهداری شود، از حالت غلظت بهینه مطلوب خارج خواهد شد [۲۴]. در نتیجه هنگامی که از این فیلم برای بسته بندی محصول غذایی استفاده می شود، با نوسان شرایط دمایی در چرخه توزیع، محصول O_2 بیشتری نسبت به O_2 نفوذ یافته به بسته بندی مصرف کرده و منجر به یک عدم تعادل و اتمسفری بی هواری درون بسته می گردد. با این وجود، اگر انرژی فعال سازی سرعت تنفس با پیر شدن محصول کاهش یابد و به اندازه مشابه انرژی فعال سازی نفوذ پذیری فیلم برسد این اثر چندان واضح نخواهد بود، نظیر آنچه برای کاسنی فرنگی گزارش شده است (جدول ۳) [۲۵].

جدول ۳- فهرست واژه ها و واحدها

A	= Area, m^2
e	= Thickness of film, m
M	= Weight of commodity, kg
P_{CO_2}	= Permeability for CO_2 , $ml.mil.m^{-2}.day^{-1}.atm^{-1}$
P_{O_2}	= Permeability for O_2 , $ml.mil.m^{-2}.day^{-1}.atm^{-1}$
R_{CO_2}	= Rate of CO_2 production rate, $ml.kg^{-1}.h^{-1}$
R_{O_2}	= Rate of O_2 consumption rate, $ml.kg^{-1}.h^{-1}$
$R_{CO_2}^A$	= Rate of CO_2 production at the $y_{O_2}^{min}$ and $y_{CO_2}^{min}$, $ml.kg^{-1}.h^{-1}$
$R_{O_2}^A$	= Rate of O_2 consumption at the $y_{O_2}^{min}$ and $y_{CO_2}^{min}$, $ml.kg^{-1}.h^{-1}$
$R_{CO_2}^B$	= Rate of CO_2 production at the $y_{O_2}^{max}$ and $y_{CO_2}^{max}$, $ml.kg^{-1}.h^{-1}$
$R_{O_2}^B$	= Rate of O_2 consumption at the $y_{O_2}^{max}$ and $y_{CO_2}^{max}$, $ml.kg^{-1}.h^{-1}$
RQ_A	= Respiratory quotient at the $y_{O_2}^{min}$ and $y_{CO_2}^{min}$
RQ_B	= Respiratory quotient at the $y_{O_2}^{max}$ and $y_{CO_2}^{max}$
y_{CO_2}	= CO_2 concentration, atm
y_{O_2}	= O_2 concentration, atm
Y_{CO_2}	= External CO_2 concentration, atm
Y_{O_2}	= External O_2 concentration, atm
$y_{CO_2}^{min}$	= Minimum CO_2 of optimum window, atm
$y_{O_2}^{min}$	= Minimum O_2 of optimum window, atm
$y_{CO_2}^{max}$	= Maximum CO_2 of optimum window, atm
$y_{O_2}^{max}$	= Maximum O_2 of optimum window, atm
β_{max}	= Maximum β value, fraction
β_{mean}	= Average β value, fraction
β_{min}	= Minimum β value, fraction

- simulated distribution chain.**
International Journal of food microbiology, 73, 331–341.
12. Charles, F., Sanchez, J. & Gontard, N. (2005). **"Modeling of Active Modified Atmosphere Packaging of Endives Exposed to Several Postharvest Temperatures."** Journal of food science, 70, 443–449.
 13. Caleb, O.J., Mahajan, P.V., Opara, U.L. & Witthuhn, C.R., (2012). **"Modelling the respiration rates of pomegranate fruit and arils."** Postharvest biology and technology, 64, 49–54.
 14. Finnegan, E., Mahajan, P.V., O'Connell, M., Francis, G.A. & O'Beirne, D., (2013). **"Modelling respiration in fresh-cut pineapple and prediction of gas permeability needs for optimal modified atmosphere packaging."** Postharvest biology and technology, 79, 47–53.
 15. Sousa-Gallagher, M.J. & Mahajan, P.V., (2013). **"Integrative mathematical modelling for MAP design of fresh-produce: Theoretical analysis and experimental validation."** Food control, 29, 444–450.
 16. Zagory, D., Kader, A.A., (1988). **"Modified atmosphere packaging of fresh produce."** Food technology 42, 70–77.
 17. Emond, J.P., Castaigne, F., Toupin, C.J. & Desilets, D., (1991). **"Mathematical modelling of gas exchange in modified atmosphere packaging."** Transactions of the american society of agricultural engineers, 34, 239–245.
 18. Iqbal, T., Rodrigues, F.A.S., Mahajan, P.V., Kerry, J.P., Gil, L., Manso, M.C. & Cunha, L.M., (2008). **"Effect of minimal processing conditions on respiration rate of carrots."** Journal of food science, 73, E396–E402.
 5. Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R. & Brecht, J.K., (2002). **"Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packaging: a review."** Journal of food engineering, 52, 99–119.
 6. Lee, D.S., Hagggar, P.E., Lee, J. & Yam, K.L., (1991). **"Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics."** Journal of food science, 56(6), 1580–1585.
 7. Song, Y., Vorsa, N. & Yam, K.L. (2002). **"Modelling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry."** Journal of food engineering, 53, 103–109.
 8. Salvador, M.L., Jaime, P. & Oria, R., (2002). **"Modelling of O₂ and CO₂ exchange dynamics in modified atmosphere packaging of burlat cherries."** Journal of food science, 67(1), 231–235.
 9. Del Nobile, M.A., Licciardello, F., Scrocco, C., Muratore, G. & Zappa, M., (2007). **"Design of plastic packages for minimally processed fruits."** Journal of food engineering, 79, 217–224.
 10. Rocculi, P., Del Nobile, M.A., Romani, S., Baiano, A. & Dalla Rosa, M., (2006). **"Use of a simple mathematical model to evaluate dipping and MAP effects on aerobic respiration of minimally processed apples."** Journal of food engineering, 76, 334–340.
 11. Jacxsens, L., Devlieghere, F. & Debevere, J. (2002). **"Predictive modeling for packaging design: equilibrium modified atmosphere packages of fresh-cut vegetables subjected to a**

quality evolution of cut Belgian endives." Journal of food science, 66, 1212-1218.

آدرس نویسنده

مشهد- فلکه پارک- دانشگاه فردوسی-
دانشکده کشاورزی- گروه علوم و صنایع
غذایی.

مروری کوتاه بر مدل سازی و طراحی بسته بندی با اتمسفر اصلاح شده برای محصولات تازه"

19. Mahajan, P.V., Oliveira, F.A.R., Sousa, M.J., Fonseca, S.C. & Cunha, L.M., (2006). "An Interactive Design of MA-Packaging for Fresh Produce. In: Hui, Y.H. ed. Handbook of food science, technology, and engineering." CRC Press, Taylor & Francis group. Boca Raton.
20. Torrieri, E. Mahajan, P.V., Cavella, S., Sousa Gallagher, M.D., Oliveira, F.A.R. & Masi, P., (2009). "Mathematical Modelling of Modified Atmosphere Package: An Engineering Approach to Design Packaging Systems for Fresh-Cut Produce." In: Papajorgji, P.J. & Pardalos P.M., eds. Advances in modeling agricultural systems. springer science & business Media, LLC.
21. González-Buesa, J., Ferrer-Mairal, A., Oria, R. & Salvador, M.L., (2009). "A mathematical model for packaging with microperforated films of fresh-cut fruits and vegetables." Journal of food engineering, 95, 158-165.
22. Iqbal, T., Oliveira F.A.R., Torrieri, E. & Sousa, M.J., (2003). "Mathematical modelling of the influence of temperature on the respiration rate of shredded carrots stored in ambient air." 12th World congress of food science & technology, Chicago, IL, July 16-19 [book of abstracts].
23. Talasila, P.C., Chau, K.V., & Brecht, J.K., (1995). "Design of rigid modified atmosphere packages for fresh fruits and vegetables." Journal of food science, 60(4), 758-769.
24. Hertog, M.L.A.T.M., & Banks, N.H., (2000). "The effect of temperature on gas relations in MA packages for capsicums (*Capsicum annuum* L., cv. Tasty): an integrated approach." Postharvest biology and technology, 20(1), 71-80.
25. Van de Velde, M.D. & Hendrickx M. (2001). "Influence of storage atmosphere and temperature on