

توسعه سامانه اندازه‌گیری میزان تنفس در محصولات کشاورزی (مطالعه موردی: کاهو)

زهرا احمدی^۱، محمدهادی خوش‌تقاضا^{۱*} و سامان آبدانان مهدی‌زاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر بسته‌بندی محصولات کشاورزی با چالش‌های اساسی مواجه بوده است. یکی از این چالش‌ها اندازه‌گیری میزان اکسیژن و دی‌اکسیدکربن در هنگام تنفس محصولات برداشت شده در انبار است. از آنجایی که سنسورها و دستگاه‌های اندازه‌گیری اکسیژن و دی‌اکسیدکربن گران قیمت هستند، محققان بدنبال یافتن روش‌های جایگزین برای اندازه‌گیری آن‌ها هستند. هدف مقاله حاضر یافتن مدلی ریاضی برای محاسبه میزان اکسیژن و دی‌اکسیدکربن محصولات کشاورزی هنگام تنفس با استفاده از اندازه‌گیری دما، رطوبت نسبی و فشار تفاضلی و مطلق در طی نگهداری کاهو است. پژوهش حاضر در سه سطح دمایی (۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس) و سه سطح مدت زمان نگهداری (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت) انجام پذیرفت. بر اساس نتایج مدل ریاضی دقت پیش‌بینی میزان اکسیژن برای دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۹۶٪، ۹۸٪ و ۹۷٪ و برای دی‌اکسیدکربن در این دماها به ترتیب برابر با ۹۵٪، ۹۹٪ و ۹۸٪ بود. همچنین در تحلیل و آنالیز آماری تغییرات پارامترهای دی‌اکسیدکربن، رطوبت نسبی، فشار تجمعی و تفاضلی، با توجه به تغییرات دما و مدت زمان انبارمانی کاهو در سطح ۱٪ معنی‌دار بود.

کلمات کلیدی: انبارمانی، اکسیژن، دی‌اکسیدکربن، دما، رطوبت نسبی، فشار تفاضلی و مطلق

Development of Respiration Rate Measurement System for Agricultural Products (Case study: Lettuce)

Zahra Ahmadi¹, Mohammad Hadi Khoshtaghaz^{1*}, Saman Abadanan Mehdizadeh²

¹Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Mechanics of Biosystems Engineering Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran

*Corresponding author: khoshtaghaz@modares.ac.ir

Abstract

In the recent years, agricultural products packaging was faced with some challenges. One of these challenges is measuring the oxygen and carbon dioxide amount during the respiration of stored products. Due to the high cost of the sensors and measuring devices of oxygen and carbon dioxide, the researchers have been looking for alternative methods for those measuring. The major aims of this study is to find a mathematical measurement method based on temperature, humidity ratio, and absolute and differential pressure during the respiration of lettuce storage. The present study was conducted at three temperature levels (5, 15, and 25 °C) and three storage time levels (24, 48 and 72 h). Based on the results of the mathematical model, the accuracy of prediction at the storage temperature of 5, 15, and 25°C for oxygen measurement were 96%, 98% and 97% and for carbon dioxide measurement were 95%, 99% and 98%, respectively. The statistical analysis of the variation parameters of carbon dioxide, humidity ratio and absolute and differential pressure with the variation of temperature and storage time of lettuce was significant at 1% levels.

Key words: Storage, Oxygen, Carbon dioxide, Temperature, Humidity ratio, Absolute and differential pressure

How to cite:

Ahmadi, Z., Hadi Khoshtaghaz, M. and Abadanan Mehdizadeh S. 2022. *Development of Respiration Rate Measurement System for Agricultural Products (Case study: Lettuce*. Journal of Agricultural Mechanization 6 (4): 57-67.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به رشد سریع جمعیت جهان، نیاز به مواد غذایی تازه و سالم در بین مصرف کنندگان افزایش یافته است. ایجاد شرایط مناسب نگهداری محصول پس از برداشت برای افزایش ماندگاری، کاهش ضایعات و حفظ کیفیت محصولات کشاورزی از مهمترین چالش‌ها در زمینه پس‌از برداشت می‌باشد. میوه‌ها و سبزی‌ها حتی پس‌از برداشت نیز تنفس می‌کنند. تنفس گیاه باعث کاهش طول عمر محصول می‌گردد، بنابراین، محققین برای کاهش یا توقف تنفس از راه حل‌های متفاوتی استفاده می‌کنند که یکی از این راه‌حل‌ها استفاده از بسته‌بندی‌های اتمسفر اصلاح‌شده یا MAP است. میزان تنفس گیاه به عوامل داخلی و خارجی بستگی دارد (Fonseca et al., 2002). فرآیند تنفس پیچیده است و مدل‌هایی که برای پیش‌بینی میزان تنفس استفاده می‌شوند، محدودیت‌هایی دارند (Caleb et al., 2013).

در سال‌های اخیر، روش‌های استفاده شده برای تعیین میزان تنفس و ارزیابی آن متفاوت بوده و همچنین تغییرات چشمگیری را تجربه کرده است؛ اما همچنان روش سامانه بسته رایج‌تر از سامانه‌های باز است و نظارت بر گازهای تولید شده توسط آنالیزورهای گاز O_2 و CO_2 با استفاده از حسگرهای الکتروشیمیایی برای O_2 و حسگرهای مادون قرمز برای CO_2 ، به جای کروماتوگرافی‌های گازی انجام می‌شود (Alves et al., 2013; Banda et al., 2015; Bhande et al., 2008; Iqbal et al., 2009). تمام روش‌ها به حذف مقدار کمی از گاز متکی هستند و دارای اندازه‌گیری‌های مداوم نیستند، بنابراین منجر به ایجاد داده‌های گسسته می‌شوند. از آنجا که توسعه سرعت تنفس یک روند مداوم و به ندرت خطی است، نقاط اندازه‌گیری گسسته باید با دقت زیادی انتخاب شوند (Fonseca et al., 2002). فشار و درجه حرارت نسبی اکسیژن تأثیر مهمی در تنفس میوه و سبزیجات دارند. بنابراین، مواد گیاهی اغلب تحت رژیم‌های مختلف دما در فضاهای کنترل شده اتمسفر آزمایش می‌شود (Helena Gomes et al., 2010; Torrieri et al., 2010). پژوهشی (Mangaraj & Goswami, 2011) با توجه به تغییرات دما میزان تنفس محصول را با استفاده از مدل آرنیوس محاسبه کردند.

همچنین در پژوهشی دیگر با توجه به تغییرات دما، میزان رطوبت نسبی و زمان میزان تنفس دانه‌های ذرت با استفاده از مدل‌های تنفسی اندازه‌گیری شد (Marcos Valle et al., 2021).

از آن جایی که نگهداری محصولات کشاورزی با کیفیت بالا و تلفات کم مورد توجه تمام فعالان حوزه کشاورزی می‌باشد، لذا ارائه راه‌حلی کارآمد برای نگهداری کیفیت و افزایش عمر انبارمانی محصولات الزامی است. با توجه به مطالبی که گفته شد یکی از مسائل مهمی که برای مطالعه وجود دارد اندازه‌گیری و مدل‌سازی تنفس محصول در شرایط متفاوت است. در عمل مدل‌سازی تنفس امکان ارائه راهکارهای پیش‌گیرانه به منظور جلوگیری از زوال محصولات مختلف در خلال انبارمانی را فراهم می‌نماید. لذا هدف از پژوهش حاضر ارائه مدل مناسب برای تنفس به منظور کنترل و مدل‌سازی دما و تنفس محصولات کشاورزی می‌باشد. در این راستا از سامانه‌ای به منظور اندازه‌گیری و مدل‌سازی تنفس کاهو در طی نگهداری استفاده شده است.

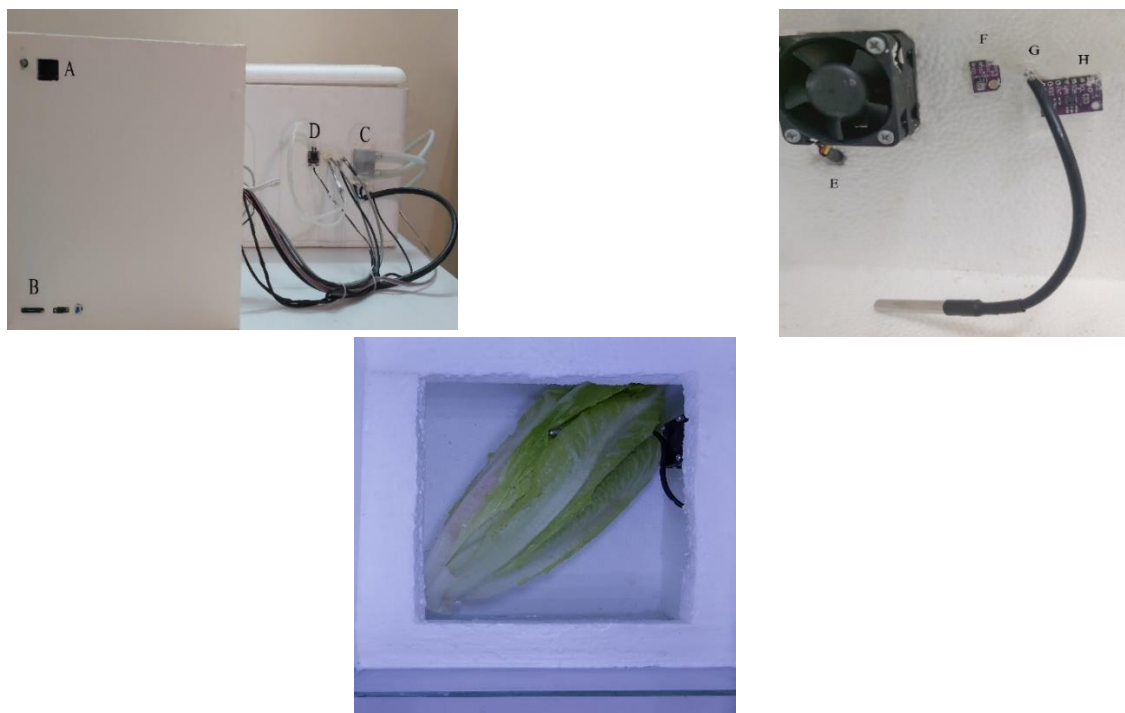
۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر سامانه‌ای به منظور اندازه‌گیری میزان تنفس محصولات کشاورزی ساخته شد. سامانه مورد نظر شامل محفظه‌ای یونولیتی با ابعاد $25 \times 25 \times 20$ سانتی‌متر و متشکل از دو بخش داده‌برداری و کنترل دما بود (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ مشخص است، بخش کنترل دما شامل خنک‌کننده^۱، سینک حرارتی^۲، پمپ آب و فن (بخش C) و بخش داده‌برداری شامل مجموعه‌ای از حسگرها (دی‌اکسیدکربن (H)، دمای محیط، فشارسنج مطلق و رطوبت سنج (F)، دمای توده^۳ (G) و فشارسنج تفاضلی (D)، واحد ارسال و ذخیره داده (B) و همچنین نمایش‌گر (A) است. هر دو بخش در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

³ Bulk temperature

¹ Peltier

² Heat sink



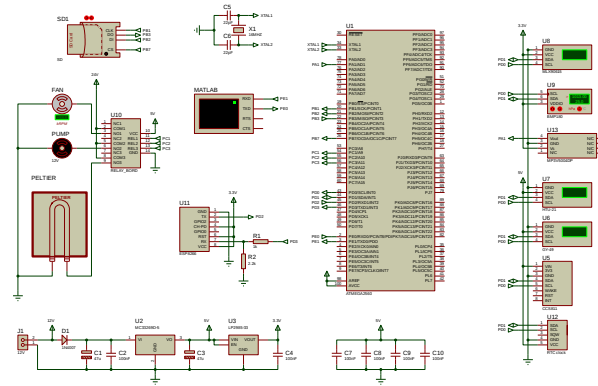
شکل ۱- سامانه اندازه‌گیری میزان تنفس محصولات
Fig 1. Product respiration measurement system

و فشار تفاضلی (MP3V5004DP، ساخت کشور تایوان، محدوده اندازه‌گیری ۲- تا ۲+ کیلوپاسکال با دقت ۲/۵ درصد) به صورت پیوسته جمع‌آوری می‌گردد. علاوه داده‌ها به صورت همزمان بر روی یک پورت URL و صفحه نمایش OLED (OLED 128X64، ساخت کشور چین) نیز نشان داده می‌شود. فرکانس داده‌برداری در این پژوهش برای حسگرها هر ۳۰ ثانیه یکبار در نظر گرفته شد؛ شایان ذکر است که این عدد قابل تنظیم توسط کاربر بود. به منظور ارسال داده‌ها به صورت بی‌سیم و مشاهده آن‌ها بر روی تلفن همراه هوشمند از ماژول ESP8266 استفاده گردید. نحوه عملکرد و اتصال به ماژول بدین صورت بود که با استفاده از این ماژول یک نقطه دسترسی با IP مشخص ایجاد می‌گردید که واحد پردازنده توانایی اتصال به این IP را از طریق WiFi برای ارسال اطلاعات دارا بود. در این دستگاه یک ماژول^۱ RTC (Elecrow، ساخت کشور چین) نیز برای ثبت زمان بکار گرفته شد.

۲-۱- مدار سامانه اندازه‌گیری میزان تنفس و کنترل دما

شکل ۲ طرح‌واره مدار داده‌برداری، ارسال داده و کنترل دما را نمایش می‌دهد. همه حسگرها و ماژول ثبت داده‌ها توسط یک ریزکنترل‌گر Atmega32 کنترل می‌شوند. در طول آزمایش میزان دی اکسید کربن (CCS811، ساخت کشور چین، محدوده اندازه‌گیری از ۴۰۰ تا ۳۲۷۶۸ ppm با دقت اندازه‌گیری ۲ درصد)، دما و رطوبت نسبی (محفظه HTU-21، کشور چین، محدوده اندازه‌گیری دما ۴۰- تا ۱۲۵+ درجه سلسیوس با دقت ۰/۳ درجه، محدوده اندازه‌گیری رطوبت ۰ تا ۱۰۰ درصد با دقت اندازه‌گیری ۲ درصد)، دمای توده حسگر مادون‌قرمز (MLX90615، ساخت کشور چین، محدوده اندازه‌گیری ۴۰- تا ۱۱۵+ درجه سلسیوس با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ درجه)، فشار مطلق (bmp180، ساخت کشور آلمان، محدوده اندازه‌گیری ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ پاسکال با دقت ۰/۰۱ پاسکال)

¹Reall time clock



شکل ۲- طرح‌واره مدار الکترونیکی سامانه اندازه‌گیری تنفس محصولات
Fig 2. Electronic schematic of the product respiration measurement system

که در آن: Δn تغییر در تعداد مول‌های ماده، $[k mol]$ ،
 $\Delta P_{isothermal}$ افت فشار در شرایط هم‌دما (که با تفاوت بین حداکثر و
نهایی تعیین می‌شود) $[kPa]$ ، T دمای گاز $[^{\circ} K]$ ، است. مقدار ماده
از مقدار ذره، m/M ، بدست می‌آید و در نتیجه می‌توان رابطه (۲) را به
صورت رابطه (۳) بازنویسی نمود:

$$\Delta m = \frac{\Delta P_{isothermal} \times V \times M_R}{R \times T} \quad (3)$$

در این رابطه، Δm مقدار ماده $[g]$ و M_R وزن مولکولی ماده
 $[44g/mol \text{ for } CO_2]$ می‌باشد. وزن دی اکسید کربن در طی فرایند
تنفس، از گرم جامدات (وزنی) به‌همراه درصد رطوبت نسبی بدست می‌آید
که طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Ubhi & Sadaka, 2015):

$$CO_2 = \frac{\Delta P_{isothermal}(pa) \times 1 \left(\frac{N}{Pa} \right) \times V(m^3) \times 44 \left(\frac{g}{mole} \right)}{8.314 \left(\frac{J}{mole.K} \right) \times 1 \left(\frac{N.m}{J} \right) \times T(K) \times w(kg)} \quad (4)$$

که در آن، CO_2 دی اکسید کربن خارج شده برحسب $[g/kg]$ است.
به همین ترتیب میزان اکسیژن (O_2) از طریق رابطه ۳ و با جای‌گذاری
مقدار وزن مولکولی اکسیژن ($32g/mol \text{ for } O_2$) محاسبه خواهد شد
(رابطه ۵):

$$O_2 = \frac{\Delta P_{isothermal}(pa) \times 1 \left(\frac{N}{Pa} \right) \times V(m^3) \times 32 \left(\frac{g}{mole} \right)}{8.314 \left(\frac{J}{mole.K} \right) \times 1 \left(\frac{N.m}{J} \right) \times T(K) \times w(kg)} \quad (5)$$

برای تأیید مناسب بودن رابطه (۴) و امکان تعمیم دادن آن به رابطه
(۵)، غلظت CO_2 همانطور که اشاره شد توسط حسگر اندازه‌گیری می-
شود. در این حالت هزینه ساخت سامانه بسیار اندک خواهد شد. به منظور

بخش کنترل دما به عنوان سیستم تنظیم دمای محفظه در نظر
گرفته شد و شامل، ۳ عدد رله، یک جت فن (PSD1204PQBX-A،
ساخت کشور چین) با ولتاژ کاری ۱۲ ولت و توان ۹ وات، المان سرد/گرم
کننده (TEC1-12715، ساخت کشور چین)، پمپ آب (مدل
Horizontal، ساخت چین) با ولتاژ کاری ۵ ولت و همچنین دبی خروجی
۱/۲ الی ۱/۶ لیتر بر دقیقه و سینک حرارتی بود. نحوه عملکرد سامانه
کنترل به این صورت بود که زمانی که دمای محفظه از دمای تنظیم شده
بیشتر می‌شد، بخش کنترلی رله به ترتیب اقدام به فعال‌سازی پمپ آب،
المان سرد کننده و نهایتاً فن می‌نمود. کنترل در نظر گرفته شده از نوع
روشن-خاموش با بازه غیر فعال $\pm 2^{\circ} C$ از دمای تنظیمی بود.

۲-۲- محاسبه میزان O_2 و CO_2 از داده‌های افت فشار و

تغییرات دما

تفاوت بین دمای اتاق و دمای جعبه بر فشار درون جعبه تأثیر می‌گذارد.
همبستگی بین افزایش فشار و اختلاف دما را می‌توان براساس قانون گاز
ایده‌آل با استفاده از رابطه (۱) محاسبه کرد (Kamide & Dobashi, 2000):

$$\Delta P = \frac{n \times R \times \Delta T}{V} \quad (1)$$

در این رابطه، ΔP افزایش فشار، $[kPa]$ ، n تعداد مول ماده،
 $[k mol]$ ، R ثابت گاز عمومی، $[8.134, kJ/k mol. ^{\circ} K]$ ، ΔT
تغییرات درجه حرارت گاز، $[^{\circ} K]$ ، V حجم گاز، $[m^3]$ ، می‌باشد. پس
از تعادل دما در جعبه، جذب دی اکسید کربن افت فشار را ایجاد می‌کند
که توسط حسگر اندازه‌گیری می‌شود. رابطه بین تغییرات در تعداد مول
ماده و افت فشار توسط معادله (۲) آورده شده‌است (توجه شود که فرایند
هم‌دما است):

$$\Delta n = \frac{\Delta P_{isothermal} \times V}{R \times T} \quad (2)$$

محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار متلب رسم و تجزیه و تحلیل گردید. همچنین به منظور تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده گردید.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- نتایج آنالیز آماری انجام شده میان پارامترهای اندازه‌گیری شده آزمایش

در این پژوهش به منظور بررسی اثر فاکتورهای آزمایش از آزمون فاکتوریل استفاده شد. این آزمایش در سه سطح دمایی ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس، سه سطح مدت زمان نگهداری ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت و سه تکرار انجام پذیرفت. بر این اساس پژوهش حاضر دارای ۹ تیمار می‌باشد که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل در بخش ۳-۱ و نتایج جدول تجزیه واریانس مقادیر دی‌اکسیدکربن، رطوبت نسبی و فشار تجمعی و تفاضلی با توجه به تغییرات دما و مدت زمان انبارمانی محصول تغییر می‌کند. مطابق جدول مشاهده گردید دی‌اکسیدکربن و رطوبت با توجه به تغییرات دما و مدت زمان انبارمانی در ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ بوده است. همچنین فشار مطلق و تفاضلی در این پژوهش با تغییرات دما و در گذر زمان در سطح ۱٪ و ۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار است. در پژوهش (Mangaraj & Goswami, 2011) نیز تغییرات تنفس (تغییرات دی‌اکسیدکربن و اکسیژن) را در سطح ۱٪ معنی‌دار دانسته‌اند. در پژوهشی دیگر (Singla et al., 2021) دریافتند که میزان رطوبت نسبی و دما بر تعریق هویج سیاه در سطح ۱٪ معنی‌دار است. این معنی‌داری بدان معناست که هرچه میزان رطوبت نسبی محیط بیشتر باشد، تعریق محصول کاهش خواهد یافت. لذا این پژوهش همراستا با پژوهش‌های دیگر محققان می‌باشد.

صحت سنجی مقدار اکسیژن دستگاه اندازه‌گیری نیز از دستگاه اکسیژن متر لوترون مدل DO-5510 استفاده شد. به دلیل نبود امکان اندازه‌گیری مرتب میزان اکسیژن با این دستگاه، در زمان‌های مشخص، تعداد اندکی داده (۱۰ نقطه) اخذ شد تا بتوان در جریان شبیه‌سازی صحت‌سنجی انجام شود.

۳-۲- محاسبه جذر میانگین مربعات و دقت نسبی در

مدل ارائه شده

در این پژوهش به منظور محاسبه خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE)^۱ از معادله ۶ استفاده گردید. خطای ریشه میانگین مربعات معیاری است که اغلب برای یافتن تفاوت بین مقادیر (مقادیر نمونه یا جمعیت) پیش‌بینی شده توسط یک مدل و مقادیر مشاهده شده محاسبه می‌گردد. این شاخص، معیاری برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی مدل‌های مختلف یک مجموعه داده خاص است و نشان دهنده دقت اندازه‌گیری می‌باشد. RMSE همیشه غیر منفی است و به طور کلی، مقادیر هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند دقت اندازه‌گیری بهتر خواهد بود

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(f(x_i) - y_i)^2}{y_i}} \quad (6)$$

پس از محاسبه خطای جذر میانگین مربعات به اندازه‌گیری میزان دقت نسبی (RAV)^۲ پرداخته شد. دقت نسبی، میزان نزدیکی مقدار اندازه‌گیری شده به مقدار واقعی در شرایط نسبی را نمایش می‌دهد. مقدار دقت نسبی با استفاده از معادله ۷ محاسبه گردید (Nedafzadeh, et al., 2018)

$$RAV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(y_i - f(x_i))^2}}{y_i} \quad (7)$$

۳-۲-۴- طرح آزمایش

در این پژوهش به منظور ارزیابی سامانه اندازه‌گیری و مدل‌سازی تنفس از محصول کاهو (رقم رومی) استفاده شد. تمام محصولات از بازار محلی به صورت تازه و روز تهیه گردید و وزن محصول در هر تیمار اندازه‌گیری ۵۰۰ گرم در نظر گرفته شد. طرح آزمایشی پژوهش حاضر در دو سطح دما و سه سطح مدت زمان نگهداری محصول با استفاده از آزمون فاکتوریل بر پایه بلوک کامل تصادفی انجام پذیرفت. نمونه‌های کاهو به مدت ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت در سه سطح دمایی ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. داده‌های فشار تجمعی، دی‌اکسید کربن، دما و رطوبت به صورت هر ۳۰ ثانیه یکبار ثبت گردیدند. نمودار تغییرات داده‌ها و همچنین نتایج آنالیز تغییرات دی‌اکسید کربن اندازه‌گیری و

² Relative Accuracy Value

¹ Root-Mean-Square Error

جدول ۱- تجزیه واریانس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری شاخص‌های کمی کاهو در مدت ۷۲ ساعت انبارمانی

Table 1. ANOVA of data obtained from the measurement of quantitative indices of lettuce during 72 h of storage

F	میانگین مربعات MS	درجه آزادی df	مجموع مربعات SS	متغیرها V	منابع تغییرات S.V
40.53*	180880.52	2	361761.046	دی‌اکسیدکربن CO_2	دما (Temperature)
77.002*	91.56	2	183.134	رطوبت Humidity	
1459.29*	392.36	2	784.732	فشارتجمعی Pressure	
468.21*	0.969	2	1.937	فشار تفاضلی Differential pressure	
28.51*	127213.9	2	254427.8	دی‌اکسیدکربن CO_2	زمان (Storage Time)
535.95*	637.322	2	1274.644	رطوبت Humidity	
491.84*	1.34	2	2.68	فشارتجمعی Pressure	
10.847**	0.022	2	0.045	فشار تفاضلی Differential pressure	
10.41*	46478.53	4	185914.155	دی‌اکسیدکربن CO_2	دما*زمان (T * ST)
17.719*	21.071	4	84.28	رطوبت Humidity	
77.7*	2.08	4	8.356	فشارتجمعی Pressure	
23.106*	0.048	4	0.191	فشار تفاضلی Differential pressure	
	4461.874	18	80313.737	دی‌اکسیدکربن CO_2	خطای آزمایشی Error
	1.189	18	21.40	رطوبت Humidity	
	0.027	18	0.484	فشارتجمعی Pressure	
	0.002	18	0.037	فشار تفاضلی Differential pressure	
		26	11936459.31	دی‌اکسیدکربن CO_2	کل Total
		26	100470.118	رطوبت Humidity	
		26	27495551.8	فشارتجمعی Pressure	
		26	138.321	فشار تفاضلی Differential pressure	

* اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ ** اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪

۳-۲- بررسی تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده

شکل ۳ داده‌های اخذ شده در سه دمای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس و مدت زمان نگهداری ۷۲ ساعت را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، با افزایش دما میزان دی‌اکسیدکربن نیز افزایش می‌یابد. تغییرات دی‌اکسیدکربن در طی آزمایشات، برای دمای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب از ۵۰۰/۱۳، ۵۰۰/۲۴ و ۵۰۰/۴۸ ppm شروع و به ۶۰۳/۴۷، ۷۳۲/۱۹ و ۸۲۲/۳۴ ppm در انتهای آزمایش افزایش یافت. تفاوت داده‌های ثبت شده ثابت کرده است که تولید دی‌اکسیدکربن در دمای ۲۵ درجه سلسیوس ۳۶/۲ درصد بیشتر از دمای ۵ درجه

سلسیوس و ۱۲/۳ درصد بیشتر از دمای ۱۵ درجه سلسیوس بوده است. با توجه به نمودار شاخص رشد دی‌اکسیدکربن را می‌توان به سه ناحیه تقسیم کرد (از ۰ تا ۱۰ ساعت، از ۱۰ تا ۵۰ ساعت و از ۵۰ تا ۷۲ ساعت). با توجه به این تقسیم بندی مشاهده می‌گردد که تولید دی‌اکسیدکربن در ۱۰ ساعت اول بسیار آهسته و با شاخص رشد به ترتیب برای دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس ۰/۴۵۷، ۰/۹۴۱ و ۲/۳۸ افزایش یافته است. با بررسی شاخص‌های رشد در این ساعت مشاهده می‌گردد هرچه دما بالاتر باشد، شاخص رشد و در نتیجه سرعت تنفس نیز افزایش یافته است. این شاخص در ۵۰ ساعت بعدی بسیار شدیدتر بوده که برای دماهای ۵،

میزان تغییرات رطوبت نسبی محفظه نگهداری در شکل ۳-ب آمده است. رطوبت نسبی در دمای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب از ۵۰/۱۱، ۴۹/۹۹ و ۵۰/۴۸ درصد در ساعت ابتدایی آزمایش به ۶۲/۸۲، ۶۹/۹۶ و ۷۳/۴۱ درصد در پایان ۷۲ ساعت افزایش یافته است. با توجه به مشاهده نمودار می‌توان شاخص رشد رطوبت نسبی را به سه ناحیه (از ۰ تا ۵ ساعت، از ۵ تا ۵۰ ساعت و از ۵۰ ساعت تا ۷۲ ساعت) تقسیم کرد. براساس مشاهده نواحی می‌توان گفت در ۵ ساعت اول شاخص رشد در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۰/۱۱۶، ۰/۳ و ۰/۱۲۵ درصد می‌باشد. در ۵۵ ساعت دوم رشد رطوبت نسبی برای دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس برابر با ۰/۲۸، ۰/۴۶ و ۰/۴۸ درصد است. شاخص رشد بالاترین میزان تغییرات را در این ناحیه زمانی در تمامی دماها به خود اختصاص داده است. با توجه به رشد سریع رطوبت نسبی در این مدت بدیهی است که تعریق گیاه به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و افزایش چشمگیری داشته است. اما پس از گذشت ۵۵ ساعت و با توجه به اشباع رطوبت درون سامانه، گیاه توانایی تعریق خود را از دست داده است. بر این اساس شاخص رشد در این زمان نیز کاهش یافته و پس از مدتی ثابت شده است. شاخص رشد در ۱۷ ساعت پایانی برای دماهای پنج، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۲ و ۰/۰۹ درصد می‌باشد. با توجه به مقادیر شاخص رشد در این آزمایش می‌توان دریافت که شیب افزایش رطوبت نسبی در ابتدای آزمایش بسیار ملایم بوده و روند تعریق در گیاه در ابتدای تنفس به کندی انجام می‌پذیرد اما با گذشت زمان این روند سرعت چشمگیری به خود اختصاص خواهد داد. با توجه به بررسی مقادیر شاخص رشد، رطوبت نسبی دمای ۲۵ درجه سلسیوس نسبت به دمای پنج و ۱۵ درجه سلسیوس با ۷۲/۶ و ۴/۳۴ درصد افزایش همراه بوده است. همچنین با توجه به دماهای متفاوت می‌توان دریافت که هرچه دما بالاتر باشد، روند تعریق نیز افزایش خواهد یافت. با مصرف اکسیژن و تولید دی‌اکسیدکربن میکروارگانیسم‌های مرتبط نیز تحت تأثیر رطوبت قرار می‌گیرند (Marcos Valle et al., 2021). عوامل داخلی مانند ویژگی‌های مورفولوژیکی، مرحله بلوغ، کوفتگی سطح و نسبت سطح به حجم و عوامل بیرونی مانند دما و فشار اتمسفر بر میزان تعرق محصولات تازه تأثیر مستقیم دارد (Caleb et al., 2013; Chourasia et al., 2005). به طور کلی، تنفس، با محتوای آب بافت کاهش می‌یابد. ترکیب محصول تعیین می‌کند که چه نوع بستری برای تنفس و در نتیجه ضریب تنفسی موجود، مناسب‌تر است (Tano et al., 2009). در پژوهش‌های متعدد تأثیر یکسان دما و رطوبت بر تنفس محصولات و دانه‌های روغنی مانند ذرت (Weinberg et al., 2008) و سویا (Ochandio et al., 2017) مورد بررسی قرار گرفته‌است.

شکل ۳-ج نشان‌دهنده فشار محیط سامانه در مدت زمان آزمایش است. از این شکل می‌توان دریافت که فشار محیط در دمای ۲۵ درجه با

۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس برابر با ۱/۸۳۸، ۴/۱۴۱ و ۶/۸۵۰ است و نشان‌دهنده شدت تنفس محصول در این نواحی می‌باشد. سرعت تنفس بالا باعث افزایش پیری بافت و کاهش توانایی محصول در دفع حمله میکروبی می‌شود (Tano et al., 2009). در شرایط نگهداری، میکروارگانیسم‌های هوازی، تا زمانی که محیط به شرایط کم اکسیژنی^۱ برسد، اکسیژن محیط را مصرف و دی‌اکسیدکربن تولید می‌کنند، پس از آن تمام فعالیت‌های هوازی متوقف می‌شود (Marcos Valle et al., 2021). بدیهی است که تولید دی‌اکسیدکربن منوط به مصرف اکسیژن محیط است، پس با کم شدن میزان اکسیژن سامانه، روند تولید دی‌اکسیدکربن نیز رو به کاهش خواهد رفت. بنابراین پس از گذشت ۶۰ ساعت، شاخص رشد دی‌اکسیدکربن برای دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس برابر با ۰/۵۶، ۱/۲۸ و ۱/۲۵ می‌گردد. چنانچه مشاهده گردید شاخص رشد دی‌اکسیدکربن در دمای ۲۵ درجه سلسیوس سرعت بالاتری نسبت به دماهای ۱۵ و ۵ درجه سلسیوس دارد. روند تنفس محصول طی ۶۰ ساعت ابتدایی آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در مقایسه با دمای ۵ و ۱۵ درجه سلسیوس به ترتیب با درصد ۲۷۴/۳ و ۶۵/۴ درصد افزایش یافت. در این آزمایش مشاهده گردید که میزان تولید دی‌اکسیدکربن پس از گذشت ۱۰ ساعت به اوج رسیده و روند تنفس، سرعت بیشتری خواهد داشت. پس از روز سوم به دلیل اشباع اتمسفر سامانه توانایی تنفس محصول کاهش یافته و شاخص رشد روندی ثابت را به خود اختصاص می‌دهد. دما نیز تأثیر چشمگیری در روند تنفس خواهد داشت. بر اساس گزارش (Mangaraj & Goswami, 2011) دما مهمترین عامل محیطی در زندگی پس از برداشت محصولات تازه به شمار می‌رود و تأثیر چشم‌گیری بر میزان واکنش‌های بیولوژیکی از جمله تنفس دارد. در محدوده فیزیولوژیکی (۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس)، میزان تنفس میوه‌ها و سبزیجات تازه به طور کلی به ازای افزایش ۱۰ درجه سلسیوس دو تا سه برابر افزایش می‌یابد. (Tano et al, 2009) در مطالعه‌ای دریافتند که تنفس کلم بروکلی در ابتدای ۲ روز نگهداری بسیار سریع بوده و پس از آن شاخص رشد تولید دی‌اکسیدکربن ثابت و تا انتهای ۳۵ روز انبارمانی تقریباً به تعادل می‌رسد. این مطالعه بر روی چهارگونه گیاهی (قارچ، توت-فرنگی، کلم بروکلی و گوجه) انجام پذیرفت. به طوری که محصولات را در بسته‌بندی‌های اتمسفر کنترل شده و در دماهای تحت کنترل نگهداری کرده و روند تنفس آن‌ها را اندازه‌گیری می‌کردند. در پژوهشی میزان تنفس هویج‌های خرد شده با کاهش دما از ۲۰ به ۴ درجه سلسیوس بین ۸۶ تا ۹۰ درصد کاهش یافت (Iqbal et al., 2009). بعلاوه Martínez-Sánchez et al. (2008) گزارش کردند که میزان تنفس چهار گونه برسیک^۲ با افزایش دما از ۱ تا ۱۲ درجه سلسیوس، دو تا چهار برابر افزایش یافت که با نتایج تحقیق حاضر در یک راستا می‌باشد.

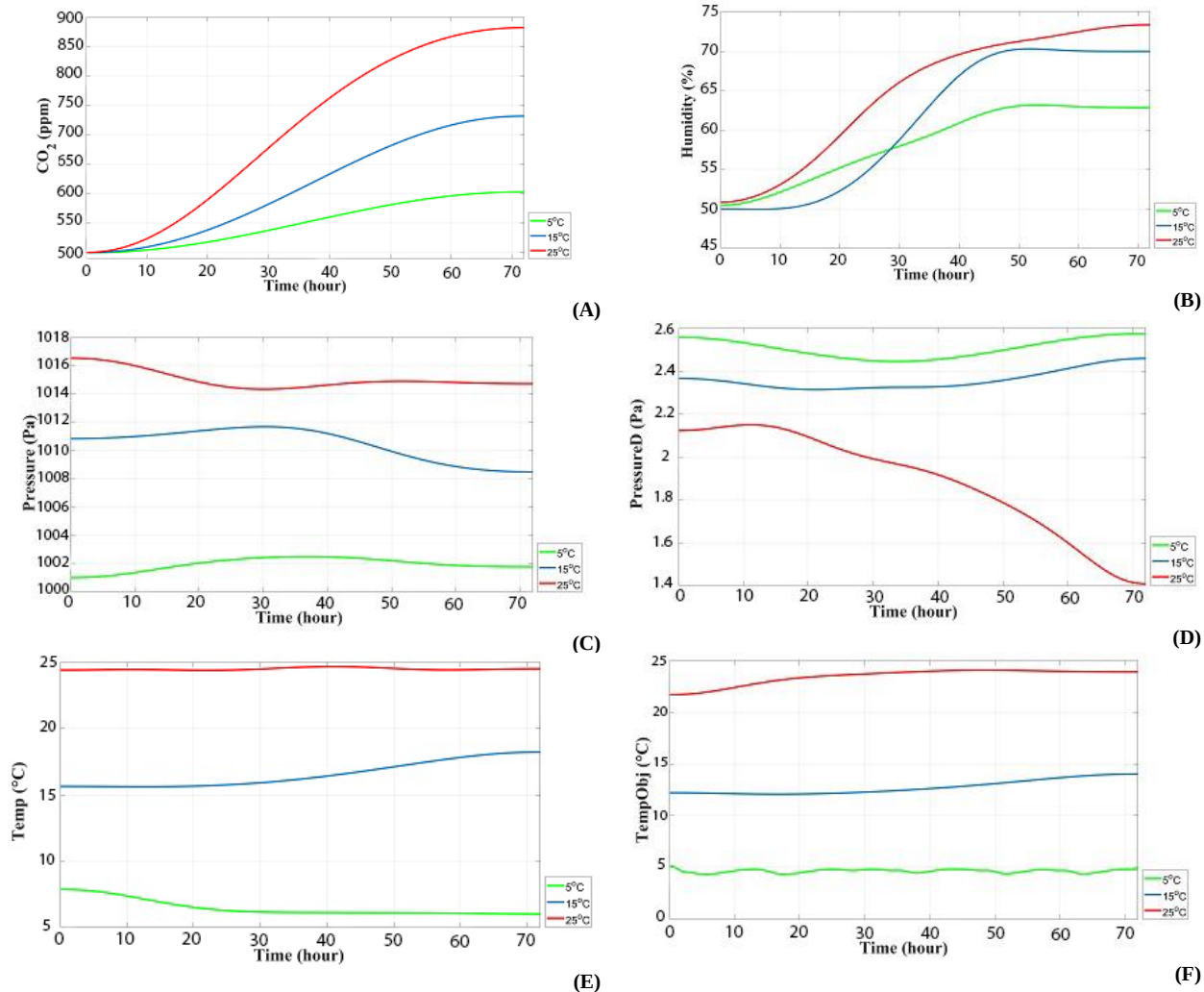
² Brassica¹ Anoxia

(Kamide & Dobashi, 2000). بنابراین روند افزایش اختلاف فشار در

دمای ۲۵ درجه سلسیوس قابل توجه می‌باشد.

شکل ۳-ه و ۳-و به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات دمای محیط سامانه و دمای توده محصول می‌باشد. باتوجه به مشاهده نمودار دمای محیط و محصول تقریباً روند ثابتی را داراست. در این پژوهش با استفاده از سامانه کنترل دما که شامل فن و خنک‌کننده می‌باشد، دمای سامانه کنترل شده و تقریباً ثابت نگه داشته شد. پس از انتخاب دمای نگهداری سامانه کنترل دما با بررسی دمای محیط سامانه و توده محصول، پس از دریافت اطلاعات در صورت افزایش دما به روشن کردن خنک‌کننده و فن مبادرت کرده و محیط سامانه را به دمای تعادل رساند. برای صحت کار خنک‌کننده از پمپ آب برای انتقال حرارت و سرد کردن خنک‌کننده استفاده شد.

اختلاف ۱۶ پاسکال از فشار محیط در دمای پنج درجه سلسیوس بالاتر بوده است. در معادله ترمودینامیکی (۲) مشخص است که دما و فشار رابطه مستقیم داشته و با افزایش دما، فشار نیز مقداری افزایش می‌یابد. شکل ۳-د اختلاف فشار بین سامانه و محیط را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار دمای ۲۵ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود اختلاف فشار بین محیط و سامانه یک روند کاهشی از ۲/۱ پاسکال در ابتدای آزمایش به ۱/۴ پاسکال در انتهای آزمایش داشت؛ در حالی که این روند در دماهای پنج و ۱۵ درجه سلسیوس به ترتیب از ۲/۳ و ۲/۵۵ پاسکال (ابتدای آزمایش) به ۲/۴ و ۲/۵۷ پاسکال (انتهای آزمایش) افزایش یافته است. تفاوت دمای محیط بیرون و درون سامانه باعث ایجاد اختلاف فشار می‌گردد و با افزایش اختلاف دما، اختلاف فشار نیز افزایش می‌یابد



شکل ۳- داده های اندازه‌گیری شده در مدت ۷۲ ساعت: الف) دی‌اکسید کربن؛ ب) تغییرات رطوبت نسبی؛ ج) تغییرات فشار تجمعی؛ د) تغییرات فشار تفاضلی؛ ه) تغییرات دمای سامانه؛ و) تغییرات دمای توده محصول

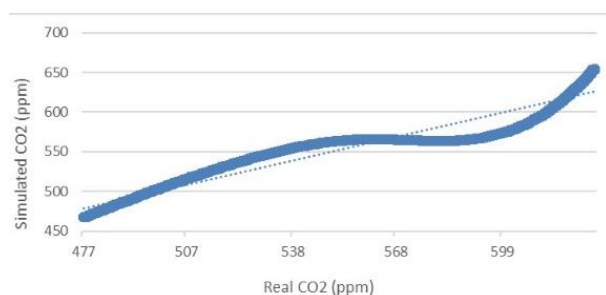
Fig 3. Data measured in 72 h; A) CO₂ changes; B) relative humidity changes; C) cumulative pressure changes; D) differential pressure changes; E) system temperature changes; F) bulk temperature changes

بیشتر بوده که بکارگیری این مدل را در سردخانه‌ها نیز امکان پذیر می‌سازد.

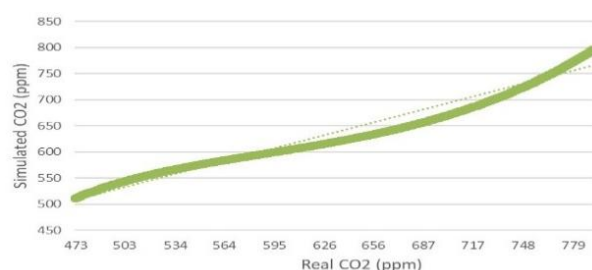
پس از اطمینان از دقت اندازه‌گیری میزان دی‌اکسیدکربن، به پیش‌بینی میزان اکسیژن با استفاده از رابطه ۵ پرداخته شد. شکل ۵ نشان‌دهنده پیش‌بینی میزان اکسیژن در مدت زمان ۷۲ ساعت آزمایش می‌باشد. پس از پیش‌بینی مقدار اکسیژن، با توجه به ۱۰ داده اندازه‌گیری شده اکسیژن با دستگاه اکسیژن متر، مقدار ضریب همبستگی میان مدل‌سازی ریاضی و داده‌های واقعی در دماهای پنج، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۹۶٪، ۹۸٪ و ۹۷٪ بدست آمد. مقدار جذر میانگین مربعات نیز در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۸، ۰/۰۰۷۵ و ۰/۰۱ ppm بود. دقت نسبی نیز برای دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۲۹۵، ۰/۰۰۰۵۲۹ و ۰/۰۰۰۸۵۳ ppm محاسبه گردید. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی، خطای جذر میانگین مربعات و دقت نسبی در این پژوهش می‌توان گفت مدل ارائه شده برای پیش‌بینی میزان اکسیژن و دی‌اکسیدکربن به عنوان مدلی مناسب برای جایگزینی حسگرها می‌باشد.

۳-۳- پیش‌بینی میزان دی‌اکسیدکربن و اکسیژن

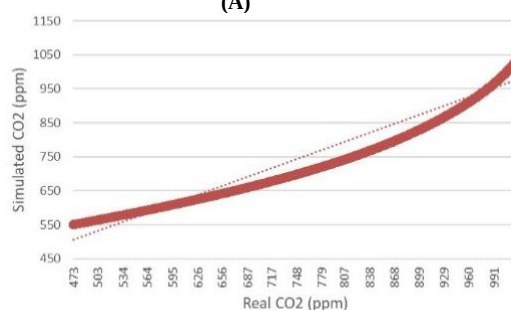
همانطور که در بخش ۱-۲ عنوان شد، داده‌های رطوبت، فشار مطلق و تفاضلی، دی‌اکسیدکربن و وزن محصول اندازه‌گیری گردید و پس از اتمام مدت زمان داده‌برداری، با استفاده از رابطه ۴ و ۵ میزان دی‌اکسیدکربن و اکسیژن به ترتیب پیش‌بینی شد. در نهایت توانایی عملکرد مدل ریاضی ارائه شده با مقایسه ضریب همبستگی (R^2)، مجذور میانگین مربعات (RMSE) و مقدار دقت نسبی (RAV) آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، با توجه به شکل ۴ میزان ضریب همبستگی دی‌اکسیدکربن بین مدل پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری شده در دماهای پنج، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۹۵٪، ۹۹٪ و ۹۸٪ می‌باشد؛ مقدار خطای جذر میانگین مربعات بین مدل ارائه شده و داده‌های واقعی نیز در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۱۴/۴۹، ۲۷/۶۲ و ۴۷/۷۶ ppm است. همچنین برای محاسبه دقت نسبی مدل برای دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۳۶/۰۰۰، ۲۶۱/۰۰۰ و ۴۷۸/۰۰۰ ppm بدست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش توانایی مدل‌سازی میزان دی‌اکسیدکربن را با دقت بالا دارد. بعلاوه میزان دقت مدل ریاضی برای دمای پنج درجه سلسیوس که در نگهداری محصولات مختلف کشاورزی توصیه شده است نسبت به دو دمای دیگر



(A)



(B)



(C)

شکل ۴- مقایسه مقدار دی‌اکسید کربن واقعی و محاسبه شده در مدت ۷۲ ساعت؛ الف) دمای ۵ °C ؛ ب) دمای ۱۵ °C ؛ ج) دمای ۲۵ °C

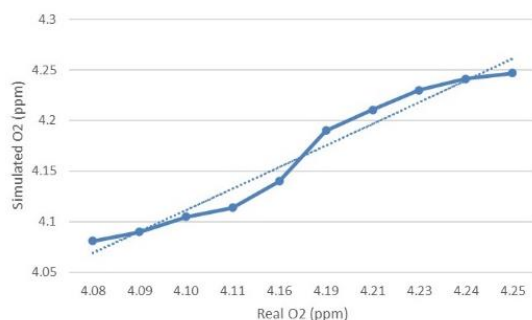
Fig 4. Comparison of actual and calculated CO_2 in 72 h; A) Temperature of 5 °C ; B) temperature of 15 °C ; C) Temperature of 25 °C

ذخیره‌سازی مختلف مانند ترکیب گاز، یعنی اکسیژن و دی‌اکسیدکربن و دما ایجاد شده است. در پژوهشی (Marcos Valle et al., 2021) میزان تنفس دانه ذرت را با استفاده از سه مدل ریاضی به ترتیب با در نظر

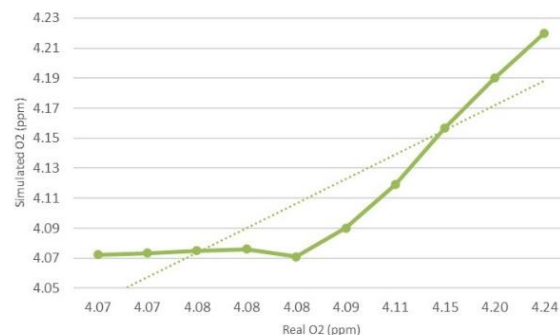
اندازه‌گیری میزان تنفس محصول در دمای انبارمانی و ترکیبات گازی زمان بر است و برای تجزیه و تحلیل گاز به تجهیزات خاصی نیاز دارد. مدل‌های ریاضی مختلفی برای ارتباط میزان تنفس با پارامترهای

ارائه شد. در این مطالعه محققان دقت مدل ارائه شده را بالاتر از ۹۶٪ محاسبه کردند (Mangaraj & Goswami, 2011). این درحالی است که مدل ارائه شده توسط پژوهش حاضر میزان دقت اکسیژن و دی-اکسیدکربن را به ترتیب بالاتر از ۹۶٪ و ۹۷٪ اعلام کرده است و می‌توان گفت مدل ارائه شده از مدل‌های دیگر قابل اطمینان‌تر می‌باشد.

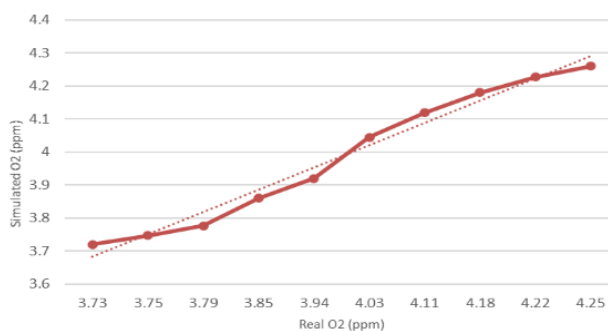
گرفتن دما و میزان رطوبت نسبی و میزان اکسیژن و همچنین ترکیب دما، میزان رطوبت نسبی و مقدار اکسیژن بدست آوردند. در این پژوهش، مدل‌ها به ترتیب توانستند میزان تنفس را با دقت بالاتر از ۹۳٪، ۸۸٪ و ۹۳٪ به خود اختصاص دهند. در پژوهشی دیگر مدل تنفسی با استفاده از بررسی داده‌های اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و دما برای محصول گاوآ



(A)



(B)



(C)

شکل ۵- مقایسه مقدار اکسیژن واقعی و محاسبه شده در مدت ۷۲ ساعت و ۱۰ نقطه؛ الف) دمای ۵ °C ؛ ب) دمای ۱۵ °C ؛ ج) دمای ۲۵ °C
Fig 5. Comparison of actual and calculated O_2 in 72 hours and 10 points; A) Temperature of 5 °C ; B) temperature of 15 °C ; C) Temperature of 25 °C

۴ - نتیجه‌گیری

برخوردار است. در نتیجه می‌توان استفاده از این سامانه را جایگزین مناسبی برای حسگرهای گران قیمت، حساس و بعضاً دارای مدت استفاده کوتاه عنوان کرد.

امروزه یکی از مهم‌ترین مباحث در بخش پس از برداشت نحوه نگهداری محصولات، به منظور افزایش عمر انبارمانی آن‌هاست. در سال‌های اخیر بسته‌بندی‌های اتمسفر اصلاح شده یکی از روش‌های مهم و نوین در صنعت پس از برداشت بوده‌است. از مهمترین دغدغه‌های این بخش از صنعت اندازه‌گیری محتوی گازی، درون بسته‌بندی‌ها می‌باشد. ارائه راهکاری مناسب به منظور محاسبه تنفس محصول طی انبارمانی برای افزایش عملکرد این بسته‌بندی‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. لذا در این پژوهش تاثیر دما بر میزان تنفس کاهو بررسی و میزان مصرف اکسیژن و تولید دی‌اکسیدکربن مدل‌سازی گردید. با توجه به ضریب همبستگی میان داده‌های واقعی و مدل‌سازی (برای اکسیژن بالاتر از ۹۶٪ و برای دی‌اکسیدکربن بالاتر از ۹۵٪) می‌توان اعلام کرد که مدل ارائه شده از توانایی بالایی برای پیش‌بینی مقادیر اکسیژن و دی‌اکسیدکربن

۵- فهرست منابع

- Marcos Valle, F. J., Gastón, A., Abalone, R. M., de la Torre, D. A., Castellari, C. C. and Bartosik, R. E. (2021). *Study and modelling the respiration of corn seeds (Zea mays L.) during hermetic storage*. Biosystems Engineering, 208, 45–57.
- Martínez-Sánchez, A., Allende, A., Cortes-Galera, Y. and Gil, M. I. (2008). *Respiration rate response of four baby leaf Brassica species to cutting at harvest and fresh-cut washing*. Postharvest Biology and Technology, 47(3), 382–388.
- NadafZadeh, M., Abdanan Mahdizadeh, S. and Salehi Salmi, M. (2018). *Predicting and controlling the moisture content of grass by an intelligent system using image processing and backup vector regression algorithm*. Journal of the Iranian Association of Vision and Image Processing Machine, 5(2), 85-102. (In Persian)
- Ochandio, D., Bartosik, R., Gastón, A., Abalone, R., Arias Barreto, A. and Yommi, A. (2017). *Modelling respiration rate of soybean seeds (Glycine max (L.)) in hermetic storage*. Journal of Stored Products Research, 74, 36–45.
- Singla, M., Kaur, P., Kumar, A. and Kaur Goraya, R. (2021). *Modelling the impact of relative humidity and storage temperature on transpiration rate of black carrot*. Journal of Food Processing and Preservation, 45(7), 1–7.
- Tano, K., Kamenan, A. and Arul, J. (2009). *Respiration and transpiration characteristics of selected fresh fruits and vegetables*. Agronomie Africaine, 17(2).
- Torrieri, E., Perone, N., Cavella, S. and Masi, P. (2010). *Modelling the respiration rate of minimally processed broccoli (Brassica rapa var. sylvestris) for modified atmosphere package design*. International Journal of Food Science and Technology, 45(10), 2186–2193.
- Ubhi, G. S. and Sadaka, S. (2015). *Temporal valuation of corn respiration rates using pressure sensors*. Journal of Stored Products Research, 61, 39–47.
- Weinberg, Z. G., Yan, Y., Chen, Y., Finkelman, S., Ashbell, G. and Navarro, S. (2008). *The effect of moisture level on high-moisture maize (Zea mays L.) under hermetic storage conditions-in vitro studies*. Journal of Stored Products
- Alves, J. A., Braga, R. A. and Vilas Boas, E. V. de B. (2013). *Identification of respiration rate and water activity change in fresh-cut carrots using biospeckle laser and frequency approach*. Postharvest Biology and Technology, 86, 381–386.
- Banda, K., Caleb, O. J., Jacobs, K. and Opara, U. L. (2015). *Effect of active-modified atmosphere packaging on the respiration rate and quality of pomegranate arils (cv. Wonderful)*. Postharvest Biology and Technology, 109, 97–105.
- Bhande, S. D., Ravindra, M. R., and Goswami, T. K. (2008). *Respiration rate of banana fruit under aerobic conditions at different storage temperatures*. Journal of Food Engineering, 87(1), 116–123.
- Caleb, O. J., Mahajan, P. V., Al-Said, F. A. J., and Opara, U. L. (2013). *Modified Atmosphere Packaging Technology of Fresh and Fresh-cut Produce and the Microbial Consequences-A Review*. Food and Bioprocess Technology, 6(2), 303–329.
- Chorasia, M. K., Maji, P., Baskey, A. and Goswami, T. k. (2005). *Estimation of moisture loss from the cooling data of potatoes*. Journal of Food Process Engineering 28, 397–416.
- Fonseca, S. C., Oliveira, F. A. R. and Brecht, J. K. (2002). *Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: A review*. Journal of Food Engineering, 52(2), 99–119.
- Helena Gomes, M., Beaudry, R. M., Almeida, D. P. F. and Xavier Malcata, F. (2010). *Modelling respiration of packaged fresh-cut "Rocha" pear as affected by oxygen concentration and temperature*. Journal of Food Engineering, 96(1), 74–79.
- Iqbal, T., Rodrigues, F. A. S., Mahajan, P. V. and Kerry, J. P. (2009). *Mathematical modeling of the influence of temperature and gas composition on the respiration rate of shredded carrots*. Journal of Food Engineering, 91(2), 325–332.
- Kamide, K. and Dobashi, T. (2000). *Fundamentals of Thermodynamics*. Physical Chemistry of Polymer Solutions.
- Mangaraj, S. and Goswami, T. K. (2011). *Measurement and modeling of respiration rate of Guava (cv. Baruipur) for modified atmosphere packaging*. International Journal of Food Properties, 14(3), 609–628.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)