

## Temperature Heterogeneity Study in Cold Storage and Its Effect on Low-Temperature Sweetening (LTS) in Potato Using Computational Fluid Dynamics

NAEIMEH SAMAVATEAN<sup>1</sup>, SIAMAK KALANTARI<sup>1\*</sup>, MOHAMMAD LAYEGHI<sup>2</sup>, MOJTABA DELSHAD<sup>1</sup>

1. Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Dec. 5, 2018- Revised: Jan. 19, 2019- Accepted: Jan. 23, 2019)

### ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to study airflow and temperature distribution in cold storage and finding temperature levels. Total sugar, reducing sugar and sucrose of potato tubers cv Sante stored at 5 °C and relative humidity of 80%, were extracted. The results showed that there was a significant difference between the concentration of total sugars, reducing sugar and sucrose due to temperature distribution heterogeneity. It led to a 2 °C difference between the warmest and coldest points in product mass. Changes in the content of sugars were matched with simulated temperature contours. The rate of increase in soluble sugars was predicted by reducing 1 °C air temperature. Total sugars, sucrose, and reducing sugar were 4.27, 3.15 and 0.67 mg/g dry matter, respectively. Computational fluid dynamics, by analyzing fluid flow and distributing temperature and detected critical areas, leads to improving packaging and product placement, and improve airflow in the stack.

**Keywords:** Plastic Packaging, Computational Fluid Dynamics, Potato, Simulation, Sugar.

---

\* Corresponding Author's Email: [kalantaris@ut.ac.ir](mailto:kalantaris@ut.ac.ir)

## بررسی ناهمگنی دما در سردخانه و تاثیر آن بر شیرین شدن در دمای پایین در سیبزمینی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

نعیمه سماواتیان<sup>۱</sup>، سیامک کلانتری<sup>۱\*</sup>، محمد لایقی<sup>۲</sup>، مجتبی دلشاد<sup>۱</sup>

۱. گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران

۲. گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران،

کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۳)

### چکیده

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مطالعه جریان هوا و توزیع دما در سردخانه و یافتن ترازهای دمایی استفاده شد. قندکل<sup>۱</sup>، قند احیا<sup>۲</sup> و ساکارز<sup>۳</sup> غده‌های سیبزمینی رقم سانته ذخیره شده در ۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۰٪ استخراج شد. نتایج نشان داد اختلاف معنی‌داری بین قند کل، قند احیا و ساکارز به دلیل ناهمگنی توزیع دما که منجر به اختلاف ۲ درجه سلسیوس بین گرم‌ترین و سردترین نقاط درون توده محصول شد، وجود دارد. تغییرات در محتوای قندها با ترازهای دمایی شبیه‌سازی شده مطابقت داشت. نرخ افزایش قندهای محلول به یک درجه سلسیوس کاهش دما، به ترتیب برای قند کل، ساکارز و قند احیا ۴/۰۷، ۳/۱۵، ۰/۶۷ میلی‌گرم بر گرم ماده خشک پیش‌بینی شد. دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۴</sup> با بررسی جریان سیال و توزیع دما و نمایش مناطق بحرانی، باعث بهبود روش‌های بسته‌بندی و چیدمان محصول و هدایت بهتر جریان هوا می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** بسته‌بندی پلاستیک، دینامیک سیالات محاسباتی، سیبزمینی، شبیه‌سازی، قند

### مقدمه

و سهم تولیدی ۹۸۳۴۰۴ میلیون تن، معادل ۱۹/۶٪ از ۴/۹ میلیون تن محصول برداشت شده در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و عملکرد بالای ۳۷ تن در هکتار قطب تولید سیبزمینی در ایران است (Anonymous, 2016-2015).

از آنجایی که سیبزمینی از محصولات زراعی نیمه فاسد شدنی است لذا نیازمند نگهداری در شرایط کنترل شده از نظر دما است بنابراین انبار کردن سیبزمینی برای هر نوع مصرف از تازه‌خوری یا فرآوری و جهت تامین منظم و پیوسته نیاز مصرف کنندگان در خارج از فصل تولید در سردخانه ضروری است (Guenther, 1995). سیبزمینی را می‌توان بیش‌تر از شش ماه در دمای مناسب سردخانه نگهداری کرد. دامنه دمایی برای نگهداری سیبزمینی با توجه به نوع آن و هدف نگهداری بین چهار تا پانزده درجه سلسیوس و با رطوبت ۸۰ تا ۹۵٪ است (Kader, 2002).

طبق آمار سازمان خواروبار جهان<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۱ میزان

سیبزمینی<sup>۵</sup> گیاهی از خانواده سولاناسه است که نسبتاً سرمدوست و جز سبزیجات فصل خنک می‌باشد. سیبزمینی در جهان گسترده‌ترین محصول غده‌ای و چهارمین محصول زراعی پس از برنج، گندم و ذرت است (FAO, 2015) و از مهم‌ترین محصولات تجاری است که نقش مهمی در امنیت غذایی جهان دارد. این محصول غده‌ای با تولید ۳۷۵ میلیون تن در سال پنجمین محصول تولید شده در واحد سطح به انرژی غذایی در هر محصول می‌باشد (FAO, 2015)، و هم‌چنان روند افزایش تولید آن به دلیل نقش مهم آن در تامین امنیت غذایی صعودی است. ایران پنجمین تولید کننده سیبزمینی در آسیا با ۵/۱ میلیون تن در سال و سیزدهمین تولید کننده سیبزمینی در جهان است (FAO, 2012). در ایران بیش‌تر از ۹۰٪ تولید سیبزمینی در مناطق معتدل و سرد طی فصل بهار و تابستان صورت می‌گیرد. همدان با سطح زیر کشت بیش از ۲۶ هزار هکتار

\* نویسنده مسئول: kalantaris@ut.ac.ir

1. Total Sugar  
2. Reducing Sugar (Glucose and Fructose)  
3. Sucrose  
4. Computational fluid dynamics (CFD)  
5. *Solanum tuberosum L.*  
6. Food and Agriculture Organization (FAO)

و بر کیفیت محصول اثر می‌گذارد (Rahemi, 2010) و باعث ایجاد شرایطی که به آن شیرین شدن دمای پایین<sup>۱</sup> (LTS)، که به دلیل افزایش معنی‌دار فعالیت بتا آمیلاز<sup>۲</sup> و اینورتاز<sup>۳</sup> و موازی با آن افزایش میزان قندهای احیای (گلوکز، فروکتوز) و ساکاروز است (Galani Yamdeu et al., 2016)، می‌گویند

بررسی‌های زیادی مربوط به کیفیت سیب‌زمینی در پنج سال گذشته انجام شده است. بیش‌تر بررسی‌های از کنترل شرایط آب و هوایی، دما و محتوای رطوبت استفاده کرده‌اند (Grubben and Keesman, 2016; Keesman et al., 2003; Lukasse et al., 2012; Van Mourik et al., 2009). همچنین بررسی‌هایی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) درباره مدل انبار سیب‌زمینی براساس تغییرات حرارت و رطوبت (Kondrashov, 2000) و پیش‌بینی تغییرات دما و رطوبت در بسته‌های سیب‌زمینی با شبیه‌سازی توزیع فضایی در انبار (Chourasia and Goswami, 2007b) انجام شده است. تا زمان نگارش این مقاله بررسی در زمینه اثر این ناهمگنی بر کیفیت محصول انبار شده مشاهده نگردیده است.

این تحقیق به بررسی تاثیر چگونگی جریان هوا و توزیع دما بر کیفیت محصول در سردخانه می‌پردازد، و در تلاش است سهم اثر این موارد را بر کیفیت محصول مشخص کند. اثری که همواره در بررسی اثر تیمارهای مختلف در محصولات مختلف بر روی کیفیت انبارمانی نادیده گرفته شده و یا به عنوان اثر تیمار در نظر گرفته شده است. تیمار مورد نظر در این آزمایش غده‌های سیب‌زمینی در بسته بندی پلاستیک به دلیل استفاده گسترده در سردخانه های استان همدان بوده است.

### مواد و روش‌ها

این آزمایش در سردخانه آزمایشگاهی گروه باغبانی و فضای سبز دانشگاه تهران در سال‌های ۱۳۹۴ الی ۱۳۹۷ انجام شده است. محصول سیب‌زمینی رقم سانتا در ۱۵ تیر ۱۳۹۶ کشت شده و در تاریخ ۱۱ آبان ۱۳۹۶ برداشت گردید، پس از درجه‌بندی و بسته‌بندی در سردخانه نگین الوند همدان، در تاریخ ۱۵ آبان به سردخانه گروه منتقل گردید. ابعاد سردخانه مذکور ۱/۹۵\*۲/۰۳\*۲/۳۰ متر و دمنده نصب شده در سردخانه از نوع محوری با قطر ۰/۲۵۴ متر و ۴۷ وات و سرعت دوران ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و بیشینه فشار ۷۵ پاسکال بوده است. دمای محیط و دمای محصول، که توسط ترموکوپل (با اندازه‌گیری دمای داخل غده) اندازه‌گیری شد، در این روز ۱۶ درجه سلسیوس ثبت شد

هدر رفت محصولات غده‌ای مانند سیب‌زمینی در کشور ایران در قسمت تولید ۱۱٪، در پس از برداشت و انبارداری ۱۹٪، در بسته‌بندی و فرآوری ۱۰٪، در شبکه توزیع ۱۱٪ و در زمان مصرف سه درصد است (Gustavsson et al., 2011). هدر رفت بیش از ۲۰٪ تولید که معادل کل تولید سیب‌زمینی تولید شده در استان همدان (۹۹۹۰۶۵ تن) است. این میزان هدر رفت باعث از دست دادن ۸۱۶۲۴/۹۶ مگاژول انرژی که ۲۷/۷۴٪ از آن انرژی تجدیدناپذیر است، می‌شود (Mohammadi et al., 2008). این مقدار سیب‌زمینی با توجه به میزان سرانه مصرف سیب‌زمینی در ایران (۴۳ کیلوگرم به ازای هر نفر) می‌تواند نیاز غذایی سیب‌زمینی بیش از ۲۳ میلیون نفر را تامین کند.

در محصول سیب‌زمینی مواردی چون ویژگی‌های ظاهری و فیزیکی سیب‌زمینی مثل یکنواختی شکل، بزرگی غده‌ها، تعداد و عمق چشم‌ها، رنگ گوشت و نیز ویژگی‌های شیمیایی مثل قندهای احیا بر کیفیت و ضایعات فرآورده‌های سیب‌زمینی تأثیر به‌سزایی دارند. فرآیندهای بیوشیمیایی که بر کاهش وزن و کیفیت غده‌ها در طول دوره انبارمانی سیب‌زمینی تأثیر می‌گذارد شامل تنفس، از دست دادن آب و جوانه زدن است که تحت تأثیر دما قرار دارند. کنترل دمایی سردخانه علاوه بر حفظ سلامت ظاهری محصول به جهت حفظ کیفیت محتوای غده‌ها از اهمیت به‌سزایی در جهت تامین غذای سالم برای جامعه و جلوگیری از هدر رفت محصولاتی که جهت نگهداری آن‌ها انرژی و زمان صرف شده است، می‌شود. کیفیت فرآورده‌های سیب‌زمینی توسط ماده خشک بالا و میزان قندهای احیا و ترکیبات فنولی پایین تعیین می‌گردد. ماده خشک بالا عملکرد محصولات فرآوری شده از سیب‌زمینی را افزایش می‌دهد (Abong et al., 2012). تنفس یک روش غیر مستقیم کاهش وزن در غده‌ها در طول زمان انبارمانی است که غیر قابل توقف است اما می‌شود روند آن را کند یا تسریع کرد. در طول زمان تنفس قندهای موجود در غده به عنوان پیش ماده برای تنفس از هیدرولیز نشاسته که سبب کاهش ماده خشک می‌شوند؛ استفاده می‌شوند (Liska et al., 2016). با سرد کردن محصول نرخ تنفس کاهش می‌یابد اما برخی واکنش‌ها رفتار کاملاً متفاوت در مقابل سرما دارند و کاهش دما به همان اندازه که سبب کاهش تنفس می‌شود در مورد دیگر سیستم‌ها سبب کاهش فعالیت نمی‌شود. این حالت به جمع شدن مواد ناشی از واکنش و کمبود مواد ترکیب شونده می‌انجامد در نتیجه نوعی بی‌تعادلی در سیستم سوخت و ساز حاصل می‌گردد و اگر این عمل به اندازه کافی شدید باشد باعث تجمع مواد ناخواسته شده

و دمای سردخانه به دمای پایه ۵ درجه سلسیوس به حالت ثابت رسیده بود. پیش از انتقال به سردخانه اندازه‌گیری‌های وزن، رنگ گوشت، ماده خشک، وزن مخصوص، مقدار قندهای احیا و نشاسته انجام گرفت.

#### اندازه‌گیری صفت‌های کمی

به منظور تعیین ابعاد محوری برای محصول سیب‌زمینی، ابعاد اصلی آن شامل قطر بزرگ (طول)، قطر متوسط (عرض) و قطر کوچک (ضخامت) با استفاده از کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی متر اندازه‌گیری شد. میانگین حسابی و هندسی قطر میوه به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه گردیدند (Mohsenin, 1970).

$$Da = \frac{(L + W + T)}{3} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$Dg = \sqrt[3]{(L \times W \times T)} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن  $Da$  میانگین حسابی (میلی متر)،  $Dg$  میانگین هندسی (میلی متر)،  $L$  طول (میلی متر)،  $W$  عرض (میلی متر) و  $T$  ضخامت (میلی متر) است.

حجم غده‌ها با اندازه‌گیری حجم مشخصی از آب ( $V_1$ ) درون بشر و سپس قرار دادن نمونه و اندازه‌گیری حجم آن ( $V_2$ ) و تفاضل دو عدد به دست آمده برابر با سانتی‌متر مکعب حجم نمونه است.

مساحت رویه سیب‌زمینی از رابطه (۳) محاسبه شده است

(Mohsenin, 1970).

$$Sm = \pi(Dg^2) \quad \text{(رابطه ۳)}$$

که در آن  $Sm$  مساحت رویه (میلی متر مربع)،  $Dg$  میانگین هندسی (میلی متر) و  $\pi$  برابر با ۳/۱۴ است.

ضریب کرویت محصول بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد (Mohsenin, 1970).

$$\phi = \frac{\sqrt[3]{(L \times W \times T)}}{L} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

با توزین هر یک از نمونه‌های انتخاب شده به وسیله ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم، درصد کاهش وزن در هر بار نمونه‌گیری با معادله (۵) محاسبه گردید (Hosseini, 1994).

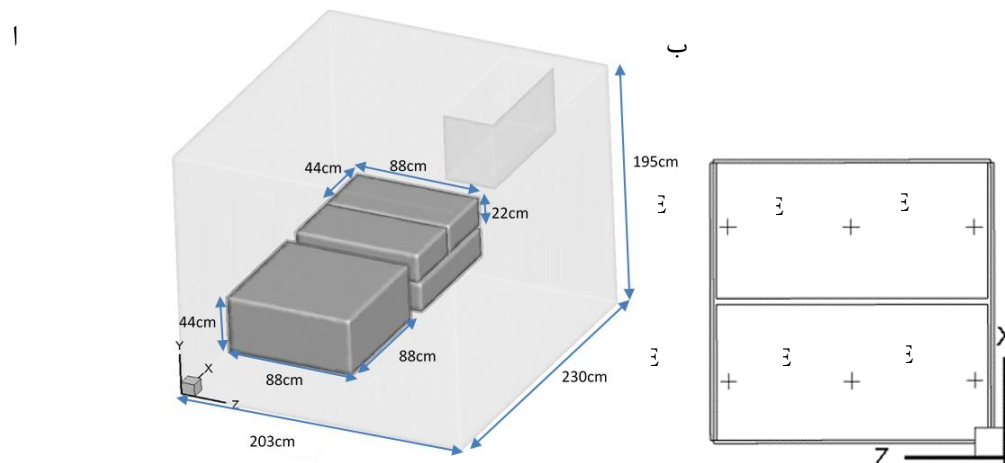
$$WLP = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100 \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن  $WLP$ ، کاهش وزن غده،  $M$  جرم اولیه نمونه (گرم) و  $M_2$  جرم ثانویه نمونه (گرم) است.

جهت محاسبه ماده خشک، مقداری از پوست یا گوشت محصول جدا شده در آون با دمای ۷۰ درجه تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفت. سپس درصد رطوبت ماده خشک مطابق رابطه (۶) محاسبه گردید (Kolbe et al., 1995).

$$Ms = \frac{(Mw - Md)}{Mw} \times 100 \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن  $Ms$  مقدار رطوبت (درصد)،  $Mw$  مقدار وزن تر محصول (گرم) و  $Md$  مقدار جرم خشک محصول (گرم) است.



شکل ۱- الف) فضای سردخانه و محل قرار گیری بسته‌ها در سردخانه، ب) محل انتخاب نمونه‌های برای اندازه‌گیری‌های کیفی و کمی (E)

خشک، درصد رطوبت، تعداد جوانه، قند محلول، قند غیر احیا، نشاسته، رنگ گوشت و پوست انتخاب شد.

#### قندهای کل

برای تهیه عصاره یک گرم نمونه خشک را در میکروتیوپ ۲ میلی

به طور میانگین هر چهار هفته  $\pm 5$  روز پس از اولین روز از قرار گرفتن غده‌ها در سردخانه از هر کیسه سه نمونه از نقاط مشخص شده در شکل ۱ و در سطوح عبور کننده از مرکز کیسه‌ها با فاصله ۲۵ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری وزن مخصوص، ماده

است، که از قانون مشهور داریسی<sup>۱</sup> به دست آمده است. رابطه خطی بین افت فشار و سرعت، زمانی که عدد رینولدز بیش از یک است نقض می‌شود. مطابق با اکثر شرایط عملی برای شرایط پیش تبرید و فرآیند خنک کردن در سردخانه‌ها، در سرعت‌های بالا جملاتی به معادله داریسی اضافه می‌شود که دوترم مقاومت ویسکوز<sup>۲</sup> و اینرسیال<sup>۳</sup> می‌باشد و افت فشاری در سلول‌های حجمی ماده متخلخل متناسب با سرعت سیال عبوری از آن اعمال می‌نماید که به رابطه داریسی-فورچ هیمر<sup>۴</sup> (۸) معروف است.

(رابطه ۸)

$$\nabla p = \left( \frac{\mu}{\alpha} u - \rho \left( \frac{C_F}{\sqrt{\alpha}} \right) |u| u_i \right)$$

که در آن  $C_F$  ضریب بدون بعد فورچ هیمر است که به هندسه تخلخل بستگی دارد. که در آن  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال و نفوذپذیری است که به هندسه، ابعاد محصول، اندازه تخلخل و توزیع تخلخل بستگی دارد. و بردار  $u$  به عنوان سرعت است. سرعت سیالی که از درون محیط متخلخل عبور می‌کند از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد (Zhao et al., 2016).

$$v = \frac{u}{\varepsilon} \quad (\text{رابطه ۹})$$

برای محاسبه  $\alpha$  و  $C_F$ ، روابط همبستگی گوناگونی پیشنهاد شده است برای محصولات نزدیک به شکل کره ضرایب ذکر شده با استفاده از رابطه ارگان ۵ (Ergun, 1952) (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{K_1(1-\varepsilon)^2}{d_{eff}^2 \varepsilon^3} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$C = \frac{K_2}{K_1^{1/2} \varepsilon^{3/2}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن‌ها  $d_{pe}$  قطر معادل سیبزمینی براساس رابطه گاسکل ۶، ۱۹۹۲،  $\varepsilon$  تخلخل توده سیبزمینی،  $K_1$  و  $K_2$  ضریب تجربی برابر ۱۵۰ و ۳/۵ است (Dehghannya et al., 2008).

با فرض تعادل حرارتی محلی بین هوا و سیبزمینی در توده، معادله انرژی حاکم در توده متخلخل با رابطه (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود (Fluent, 2011).

(رابطه ۱۲)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_{ma} E_{ma} + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{u} (\rho_{ma} E_{ma} + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{T}_{eff} \cdot \vec{u})) + S_h^p$$

(رابطه ۱۳)

$$k_{eff} = \gamma k_{ma} + (1 - \gamma) k_p$$

لیتر توزین کرده و با یک میلی لیتر اتانول ۹۶٪ به مدت سی ثانیه ورتکس و براساس روش مک کردی و همکاران (۱۹۵۰) عصاره‌های مورد نظر برای خواندن میزان جذب نوری در ۶۲۰ نانومتر با دستگاه اسپکتوفوتوتر ۹۶ خانه مدل (Micro plate reader EON, Biotek) ساخت آمریکا ثبت گردید (McCready et al., 1950). قندهای غیر احیا به روش هندل (۱۹۶۸) آماده شد و سپس جذب نور هر یک از محلول‌ها در طول موج ۶۲۰ نانومتر با دستگاه مذکور خوانده شد (Van Mourik et al., 2012).

#### هندسه مدل

بسته‌ها پس از پر شدن دارای ابعاد ۰/۸۸ متر طول، ۰/۴۴ متر عرض و ۰/۲۲ متر ارتفاع شدند. هر چهار بسته روی هم قرار گرفته و یک توده را تشکیل دادند؛ فواصل بین توده‌ها و سقف، کف و دیواره‌های جلویی و عقبی سردخانه به ترتیب ۱۵، ۱۱۵، ۸۵ و ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شد.

#### مدل‌سازی اغتشاش

عدد رینولدز جریان در سردخانه، بر مبنای قطر دمنده از رابطه (۷) که  $\rho$  چگالی سیال،  $v$  سرعت متوسط جریان و  $L$  قطر هیدرولیک و  $\mu$  ضریب گرانروی سیال است، محاسبه گردید. عدد رینولدز بیش از ۹۰ هزار محاسبه شد که نشان دهنده جریان مغشوش است (Harral and Boon, 1997; Versteeg and Malalasekera, 1995).

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (\text{رابطه ۷})$$

#### روش‌های شبیه‌سازی

در صنعت غذا طیف گسترده‌ای از فرآیندهای انتقال پدیده‌های گرما، جرم و جریان سیال، (به عنوان مثال مخلوط کردن، خشک کردن، پخت و پز، استریلیزه کردن و ذخیره سازی در سردخانه) را با مقیاس‌های مختلف از طریق محیط متخلخل بررسی می‌کنند. همچنین این روش جهت بررسی نحوه خنک شدن و فرآیند تبرید در محصولات به صورت توده یا انبوه با بسته‌بندی و یا بدون بسته‌بندی برای محصول سیب (Zou et al., 2006a, b)، سیبزمینی (Chourasia and Goswami, 2006, 2007b)، توت فرنگی (Anderson et al., 2004)، پرتقال (Defraeye et al., 2015)، انگور (Delele et al., 2013) و گوجه فرنگی (Datta, 2007a, b) استفاده شده است.

برای جریان‌های کوچک سیال، نرخ جریان هوا متناسب با افت فشار است که رابطه بین افت فشار و سرعت حجمی متوسط

5 Ergun relations

6 Gaskell

1 Darcy

2 Viscous terms

3 Inertial terms

4 Darcy-Forchheimer

از تابع دیواره، از میان توابع مختلف دیواره که در مدل اغتشاشی کی-ایپسلون استاندارد قابل استفاده است، تابع دیواره استاندارد انتخاب شد. این تابع که براساس تحقیقات پیشنهاد شده است در کاربردهای صنعتی بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است (Grubben and Keesman, 2015; Sajadiye et al., 2011).

هندسه و گسسته‌سازی مدل‌ها و فرآیند حل معادله‌ها در نرم افزار انسیس فلونت ۱۱ انجام شد. برای دقت شبیه‌سازی از رویه بالادستی مرتبه اول<sup>۱۲</sup> و برای جفت نمودن فشار-سرعت<sup>۱۳</sup> از الگوریتم سیمپل<sup>۱۴</sup> و برای مدل اغتشاشی از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس رینولدز استفاده گردید. این روش مدل‌سازی اغتشاش علاوه بر این که به طور قابل ملاحظه‌ای از هزینه محاسبه‌ها می‌کاهد برای انواع مسائل کاربردی در مهندسی سازگار شده است. محاسبات با استفاده از کامپیوتر با پردازنده اینتل ۷ هسته‌ای با فرکانس پردازش ۲/۵ گیگاهرتز و حافظه موقت ۸ گیگا بایت انجام شد. گام زمانی در ابتدا با ۰/۱ ثانیه آغاز شده و به صورت تدریجی به ۱۰ ثانیه رسید. پس از گذشت زمان فیزیکی ۳۰۰ ثانیه از ابتدای فرآیند، خواص توده متخلخل و معادلات انتقال حرارت بسته‌ها (تنفس) در مدل اعمال گردید. دمای اولیه ۱۶ درجه سلسیوس و کسر جرمی ۰/۸ برای بخار آب در فضای سردخانه به عنوان شرایط اولیه به مدل اضافه گردید. شاخص همگرایی برای مقادیر مطلق باقی مانده به کمتر از ۱۰<sup>-۳</sup> برای پیوستگی، سرعت، کی، ایپسلون و کمتر از ۱۰<sup>-۶</sup> برای معادله انرژی اعمال گردید و سپس گام‌های زمانی به ۱۰۰ ثانیه افزایش داده شد و نتایج مربوط به هر گام زمانی ذخیره شد. شبیه‌سازی تا هم‌دم شدن دمای نقاط متناظر با محل قرارگیری سنسورها در بسته‌ها با دمای اندازه‌گیری و ثبت شده در سردخانه ادامه یافت. تمامی نمودارها و خط‌های هم دمایی در این مرحله زمانی استخراج شدند. برای شبیه‌سازی سردخانه با در نظر گرفتن توانایی پردازش رایانه و هزینه محاسباتی، مش چهاروجهی با اندازه ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

پارامترهایی که در شبیه‌سازی جریان هوا و انتقال حرارت در فرآیند تبرید در سردخانه مورد استفاده گرفتند شامل پارامترها و خواص مربوط به سیب‌زمینی و سیال عامل (هوای مرطوب) و

که در آن‌ها  $E_s$  و  $E_{ma}$  به ترتیب انرژی مجموع<sup>۱</sup> در فازهای هوای مرطوب و جامد در توده متخلخل می‌باشند.  $k_{eff}$  ضریب هدایت گرمایی موثر در توده متخلخل<sup>۲</sup> بوده و از رابطه ۱۳ و با استفاده از  $k_{ma}$  ضریب هدایت گرمایی هوای مرطوب با  $k_p$  ضریب هدایت گرمایی محصول محاسبه گردید.  $h_j$  آنتالپی استاتیک<sup>۳</sup> و  $\bar{T}_{eff}$  تانسور تنش<sup>۴</sup> و  $\bar{J}$  شار انتشار بخار آب<sup>۵</sup> و  $p$  فشار هوا می‌باشند.  $S_h^p$  چشمه انرژی<sup>۶</sup> است که حاصل فرآیند تنفس (واکنش گرمای تنفس) سیب زمینی بوده و مطابق با رابطه (۱۴) در محاسبه گردید (Chourasia and Goswami, 2006):

$$S_h^p = (\rho_{bulk} q_p) \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

که در آن  $\rho_{bulk}$  چگالی توده متخلخل سیب‌زمینی،  $h_l$  گرمای نهان تبخیر در دمای سردخانه<sup>۷</sup>،  $q_p$  سرعت تولید گرمای تنفس به ازای واحد جرم توده<sup>۸</sup> بوده و براساس روابط (۱۵) و (۱۶) (Chourasia et al., 1999) قابل محاسبه است:

$$q_p = \frac{[0.8039(T - 273.13) + 14.303]}{1000} \quad T > 276.13K \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$q_p = \frac{[-0.8196(T - 273.13) + 20]}{1000} \quad 273.13 \leq T \leq 276.13K \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

از آنجایی که حل مستقیم معادلات انتقال در جریان مغشوش نیاز به توان محاسباتی بالایی دارد. در این تحقیق با توجه به وجود حجم محاسباتی بالا و نتایج قابل قبول در منابع، روش کی-ایپسلون استاندارد که پیشتر نیز در تحقیقات انجام شده است در شبیه‌سازی جریان هوا و انتقال حرارت در سردخانه مورد استفاده قرار گرفت. (Chourasia and Goswami, 2007b; Defraeye et al., 2015; Defraeye et al., 2014; Nahor et al., 2005)

دیواره‌های سردخانه دارای شار حرارتی ثابت<sup>۹</sup> صفر و دیواره بسته‌ها را با توجه به درصد فضای باز بسته‌ها (پوشش پلاستیکی در یک قطعه ۱۰ سانتی متر مربعی از پوشش پلاستیک برابر با ۰/۲ تخلخل) و متفاوت از تخلخل توده سیب‌زمینی (۰/۴) درون بسته‌ها با قابلیت هدایت گرمایی در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی اغتشاش در نزدیکی دیواره‌ها و اجتناب از ریزنمودن شبکه در زیرلایه ویسکوز<sup>۱۰</sup> و به دلیل وجود حجم محاسباتی بالا

9 Fixed heat flux

10 Viscous sub layers

11 Ansys Fluent

12 First order upwind scheme

13 Pressure-velocity coupling

14 SIMPLE algorithm

1 Total energy, J

2 Effective thermal conductivity of porous zone, W m-1 C-1

3 Static enthalpy, J kg-1

4 Diffusion flux of water vapor

5 Stress tensor, Pa

6 Volumetric heat sources (energy source term), J m-3 s-1

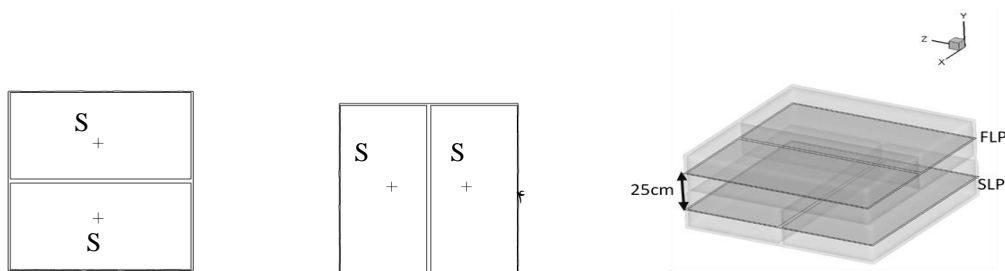
7 Latent heat of water at 0 C, J kg-1

8 Rate of respiratory heat generation per unit mass of product J s-1 kg-1

محیط متخلخل در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای مربوط به سیب‌زمینی و سیال عامل (هوای مرطوب) و محیط متخلخل

مقدار / معادلات مورد استفاده برای پارامترهای ورودی		پارامترها
منبع	مقدار / واحد	
<b>سیب‌زمینی</b>		
	$Wm^{-1}K^{-1}$	هدایت حرارتی
(Chourasia and Goswami, 2007a)	$J kg^{-1} K^{-1}$	گرمای ویژه
(Chourasia and Goswami, 2007a)	$kg m^{-3}$	چگالی
	K	دمای ابتدایی
<b>هوا- بخار آب</b>		
(Fluent, 2011)	$kg m^{-3}$	چگالی سیال
		$\rho_f = \frac{p}{RT \sum (\frac{Y_a}{M_a} + \frac{Y_i}{M_i})}$
(Fluent, 2011)	Pa s	ویسکوزیته دینامیکی
(Fluent, 2011)		کسر حجمی هوا
	K	دما
(Fluent, 2011)	$Wm^{-1}k^{-1}$	هدایت حرارتی سیال
(Fluent, 2011)	$J kg^{-1} k^{-1}$	گرمای ویژه سیال در $\square$ ۴
		$C_{pf} = Y_i C_{pi} + Y_a C_{pa}$
<b>محیط متخلخل</b>		
		تخلخل در محیط متخلخل محصول
		$\epsilon = 1 - \frac{\frac{m_{bulk}}{V_{bulk}}}{\frac{m_r}{V_r}}$
(Chourasia and Goswami, 2006)	$kg m^{-3}$	چگالی محیط متخلخل
(Fluent, 2011)	$Wm^{-3}$	آنتالپی چشمه مومنتوم
		مقاومت ویسکوز
(Fluent, 2011)		مقاومت اینرسیال
		تخلخل در دیواره بسته‌ها



شکل ۲- محل قرار گیری سنسورها (S) درون غده‌ها در مرکز بسته‌ها در سطوح بالایی<sup>۱</sup> و پایینی<sup>۲</sup>

گردید. سنسورها در محل‌های مشخص شده در شکل ۲ درون بسته‌ها در سردخانه قرار گرفتند. هر چهار سنسور دما به یک دمانگار<sup>۴</sup> چهارکاناله متصل شده و به وسیله درگاه به مودم متصل گردید داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت آنلاین در سایت شرکت قابل مشاهده، میانجی‌ابی و ذخیره‌سازی بود.

### تصدیق مدل شبیه سازی شده

سیب‌زمینی‌ها در درون هشت بسته با ابعادی که پیشتر در مبحث هندسه مدل بیان گردید در سردخانه قرار داده شدند. برای اندازه‌گیری دمای هوا و دمای محصول به ترتیب از ۲ و ۷ حسگر با دقت ۰/۰۱<sup>۳</sup> ساخت شرکت دانش بنیان برناتا ایران<sup>۳</sup> دارای گواهی کالیبراسیون از شرکت سازنده (شرکت برناتا) استفاده

3 Gastrotherm, T °C -40 to +85 and RH% 0 – 99, 3.5 mm jack, ±0.01 °C Accuracy from -10°C to +85°C, Bruntab, I.R.I.  
4 Thermometer

1 First Level of Package (FLP)  
2 Second Level of Package (FLP)

جهت بررسی اثر معنی دار تفاوت حاصل از ناهمگونی دما بین دو لایه از بسته‌های محصول در فاصله‌های ۴۲ و ۶۵ سانتی‌متری از کف سردخانه، از آزمون T جفت شده برای مقایسه قند کل، قند احیایی، ساکارز، کاهش وزن بین دو سطح و از آزمون میانگین مربعات برای مقایسه قند کل، قند احیایی و ساکارز در صفحات عمودی عبور کننده از سه نقطه با فواصل ۲۲، ۴۴ و ۶۶ سانتیمتر از ابتدای توده با نرم‌افزار اس پی اس<sup>۱</sup> استفاده شد.

### نتایج

تعیین خصوصیات کمی و کیفی سیب‌زمینی رقم سائنه قبل از انبارمانی ویژگی‌های فیزیکی از مهم‌ترین عوامل در روند خنک شدن و شبیه‌سازی محصول است. مشخصات فیزیکی غده‌های سیب‌زمینی قبل از قرار گرفتن در انبار اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

جدول ۲- داده‌های آماری نمونه‌های سیب‌زمینی رقم سائنه

انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	شاخص‌های اندازه‌گیری شده کمی و کیفی
۰/۶۸	۸/۸۱	۹/۹۰	۷/۴۱	قطر بزرگ (سانتی‌متر)
۰/۵۴	۷/۵۳	۸/۴۰	۶/۸۰	قطر متوسط (سانتی‌متر)
۰/۵۹	۵/۷۵	۷/۲۱	۴/۹۳	قطر کوچک (سانتی‌متر)
۰/۴۹	۷/۲۴	۸/۱۳	۶/۵۰	قطر متوسط هندسی (سانتی‌متر)
۴/۱۲	۸۲/۳۹	۸۹/۲۷	۷۵/۶۲	درصد کروییت
۳۷/۶۲	۲۲۷/۵۷	۳۲۵/۱	۱۷۶/۷	وزن تر (گرم)
۱/۵۳	۷۷/۵۱	۸۱/۷۱	۷۶/۱۱	درصد رطوبت
۴/۳۱	۲۱۷/۱۹	۳۰۱/۷۱	۱۶۳/۸۹	حجم (سانتی‌متر مکعب)
۰/۰۹۲	۱/۰۵	۱/۱۲	۰/۷۵	وزن مخصوص
۱/۸۷	۲/۸۷	۶/۷۸	۱/۳۹	قند کل (میلی‌گرم بر گرم)
۱/۰۸	۲/۱۹	۵/۷۴	۱/۱۷	ساکارز (میلی‌گرم بر گرم)
۰/۴۴	۰/۵۸	۱/۰۴	۰/۲۸	قندهای احیایی (فروکتوز+گلوکز) (میلی‌گرم بر گرم)

از سه شبکه با یک‌دیگر مقایسه شدند. تعداد کل سلول در مش اول ۱۰۹ هزار ۲۱۹ سلول در نظر گرفته شد که با تغییر اندازه مش از ۲ سانتی‌متر به ۱/۵ سانتی‌متر به ۸۳۱ هزار و ۵۸۶ سلول (هشت برابر شبکه اول) رسید. تعداد سلول در شبکه سوم به یک میلیون و ۱۱۹ هزار ۸۲۸ سلول (۱۰/۲۵ برابر شبکه اول) رسید. نتایج شبیه‌سازی این سه شبکه شامل متوسط سرعت درون بسته‌ها و متوسط دمای محصول با یک‌دیگر مقایسه شدند. مقادیر سرعت و دما برای سه شبکه در جدول ۳ ارائه شده است. با استفاده از برون‌یابی ریچاردسون مقدار کمیت‌های مورد بررسی

### مطالعه شبکه (عملیات تایید مدل)

هنگامی که شبکه بی‌نهایت ریز می‌شود خطای گسسته‌سازی فضایی<sup>۲</sup> به صفر نزدیک می‌شود. این آزمایش توسط روچه و همکاران (۱۹۸۶) و براساس استفاده از برون‌یابی ریچاردسون<sup>۳</sup> تدوین شده است. مطابق با این روش، با دانستن کمیتی خاص (به عنوان مثال سرعت) در دو سطح متفاوت مش، می‌توان مقدار نهایی آن کمیت را در تعداد مش بی‌نهایت زیاد پیش‌بینی نمود و خطای مربوط به مش ریز و مش درشت را محاسبه کرد. در این پژوهش برای بررسی استقلال از شبکه، نتایج شبیه‌سازی حاصل

3 Richardson extrapolation

1 SPSS

2 Discretization error Spatial



ایجاد نشده است و خطای گسسته سازی به خطای گسسته سازی در شبکه دوم نزدیک می باشد. بنا براین استفاده از شبکه دوم و تنها بسنده کردن به میزان سلول‌های ایجاد شده در شبکه بندی نوع دوم (شکل ۳) علاوه بر حجم محاسباتی مطلوب، نتایج قابل قبول شبکه سوم را نیز همراه داشته است.

در اندازه مش بی‌نهایت کوچک برون‌یابی و سپس مقادیر خطا محاسبه شد. مقادیر برون‌یابی کمیت‌ها و خطای گسسته سازی به ترتیب در مقایسه شبکه‌های اول و دوم و مقایسه شبکه‌های اول و سوم آرایه شده است (جداول ۴ و ۵). با حدود ۱۰ برابر شدن تعداد سلول‌ها بهبود قابل ملاحظه‌ای در خطای گسسته سازی

جدول ۳- مقادیر سرعت جریان و دمای پیش‌بینی شده در سه شبکه اول، دوم و سوم

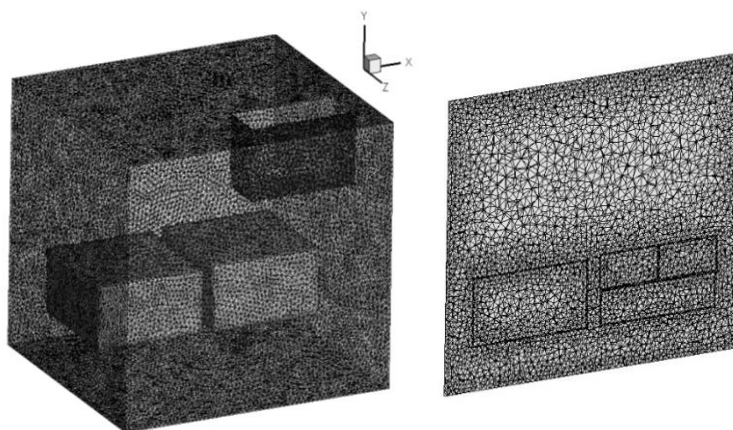
کمیت‌ها	تعداد سلول	دمای متوسط محصول درون بسته (K)	سرعت متوسط جریان هوا در درون بسته ( $m s^{-1}$ )
شبکه اول	۱۰۹۲۱۹	۲۸۸/۴۳۷	۰/۰۷۵۲
درصد تغییرات بین شبکه اول و دوم		۰/۳۴	۳۲/۱۸
شبکه دوم	۸۷۳۷۵۸	۲۸۷/۴۳۷	۰/۰۹۹۴
درصد تغییرات بین شبکه دوم و سوم		۰/۰۰۵۲	۳/۸۲
سوم		۲۸۷/۴۵۲	۰/۱۰۳۲

جدول ۴- مقادیر برون‌یابی سرعت جریان (متر بر ثانیه) و خطای گسسته سازی در مقایسه شبکه اول و دوم

کمیت‌ها	شبکه اول	شبکه دوم	برون‌یابی	درصد خطا
سرعت متوسط جریان هوا در درون بسته‌ها ( $ms^{-1}$ )	۰/۰۷۵۲	۰/۰۹۹۴	۰/۱۰۷۵	۸/۱۱
دمای متوسط محصول در درون بسته (K)	۲۸۸/۴۳۷	۲۸۷/۴۳۷	۲۸۷/۱۰۴	۰/۱۱

جدول ۵- مقادیر برون‌یابی سرعت جریان (متر بر ثانیه) و خطای گسسته سازی در مقایسه شبکه‌های اول و سوم

کمیت‌ها	شبکه اول	شبکه سوم	برون‌یابی	درصد خطا
سرعت متوسط جریان هوا در درون بسته‌ها ( $ms^{-1}$ )	۰/۰۷۵۲	۰/۱۰۳۲	۰/۱۱۰۷	۷/۲۹
دمای متوسط محصول در درون بسته (K)	۲۸۸/۴۳۷	۲۸۷/۴۵۲	۲۸۷/۱۸۷	۰/۰۹



شکل ۳- ساختار مش در حجم شبیه سازی شده و صفحه عبور کننده از مرکز سردخانه

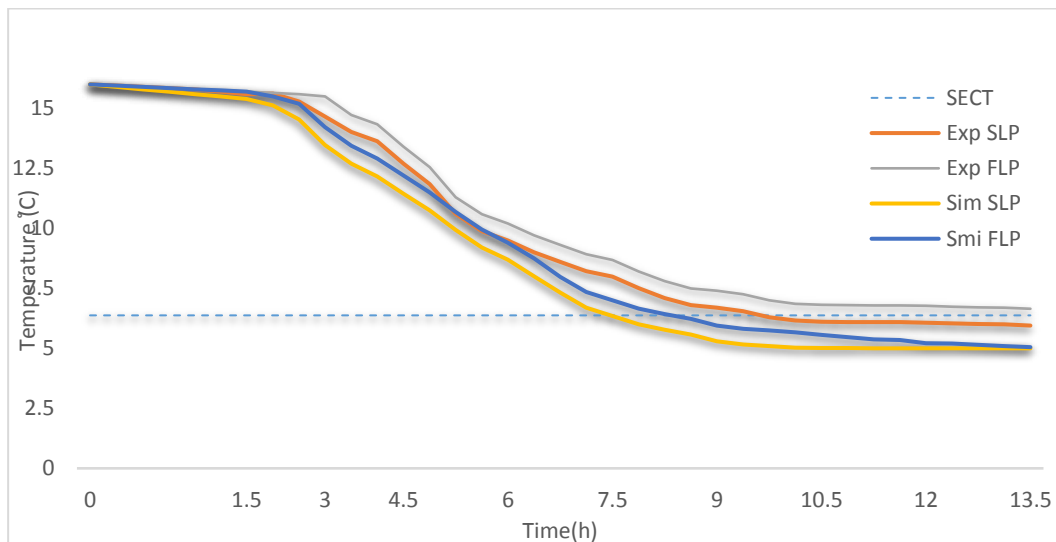
سردخانه نشان می‌دهند. از آن جایی که هر کدام از سنسورها در وسط یک عدد غده و در مرکز بسته قرار داده شده است متاثر از یک جریان محلی می باشد. دمای متوسط مرکز بسته‌ها در دو سطح بالایی و پایینی به دمای ثابت ۵ درجه سلسیوس نرسیده و همواره اختلاف دما بین دمای مرکز سیب‌زمینی در مرکز بسته‌ها

#### عملیات تصدیق مدل

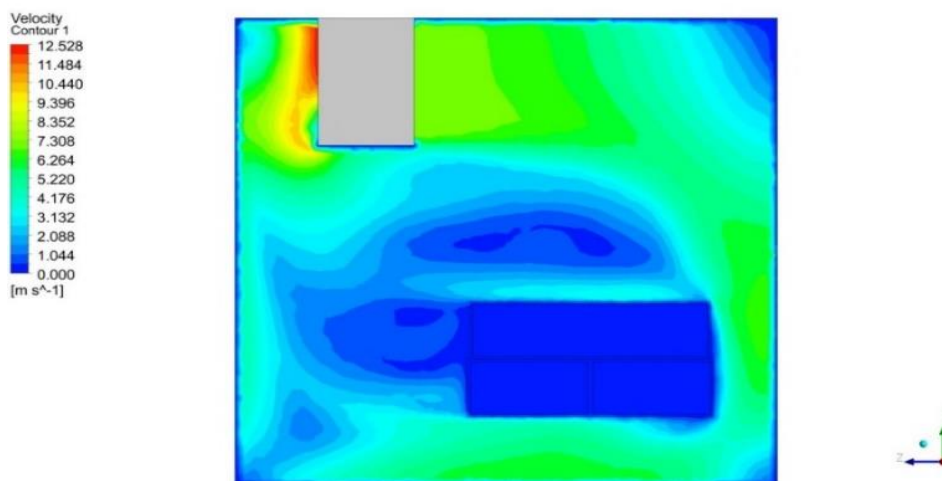
منحنی تبرید محصول مربوط به روند کلی و غالب سرد شدن نتایج مدل و نتایج اندازه‌گیری شده در بسته‌های پلاستیکی در شکل ۴ نشان داده شده است. نسبت به نتایج شبیه سازی، نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده عدم یکتواختی دمایی بیش‌تری را در

که دمای مرکز بسته‌ها به مقدار ثابت مد نظر برسد گردش جریان هوای سرد توسط فن متوقف شده و دمای درون مرکز بسته‌ها به دلیل نرخ تنفس بیشتر، بالاتر از مقدار پیش‌بینی شده بماند. همین امر باعث گسترش سطوح دمایی بالاتری در نقاط با گرمای حرارتی تنفس بیشتر می‌شود. متوسط دما بین بسته‌های قرار گرفته در سطوح پایینی و بالایی در بسته بندی پلاستیکی ۵/۹ و ۶/۶ درجه سلسیوس به ترتیب است. همچنین اختلاف دما بین دو سطح بالایی و پایینی در بسته بندی پلاستیک ۰/۶ درجه گزارش شد. اختلاف دما به دلیل تخلخل سطح پلاستیک و عبور جریان هوا و نفوذ هوا و انتقال حرارت از محصول به سیال به دلیل حرکت سیال است که باعث می‌شود خنک شدن تدریجی و با پدیده همرفت اتفاق بیفتد (Defraeye et al., 2014).

و دمای هوا وجود دارد که به دلیل تنفس و انتشار حرارت از محصول است. زمان دمایی هفت هشتم تبرید<sup>۱</sup> (مدت زمانی که طول می‌کشد تا دمای هوا یا محصول به هفت هشتم اختلاف دمای اولیه و مورد نظر برسد) در مدل شبیه‌سازی برای سطح پایینی در بسته پلاستیکی ۷/۵ ساعت و برای سطح رویی ۸/۴۵ ساعت به ترتیب محاسبه شده است. با توجه به این که خاموش و روشن شدن فن با ترموکوپل متصل در دورترین نقطه، نسبتبه جهت خروج هوای خنک از فن کنترل می‌شد و دمای ثبت شده با اختلاف یک درجه گرمتر از دمای تنظیم شده (۵ درجه سلسیوس) شروع کار فن بوده است و فن در حدود ۱۰ دقیقه دمای هوای درون سردخانه را به دمای تنظیم شده برای سردخانه می‌رساند لذا این‌گونه کارکردن فن سبب می‌گردد که قبل از این



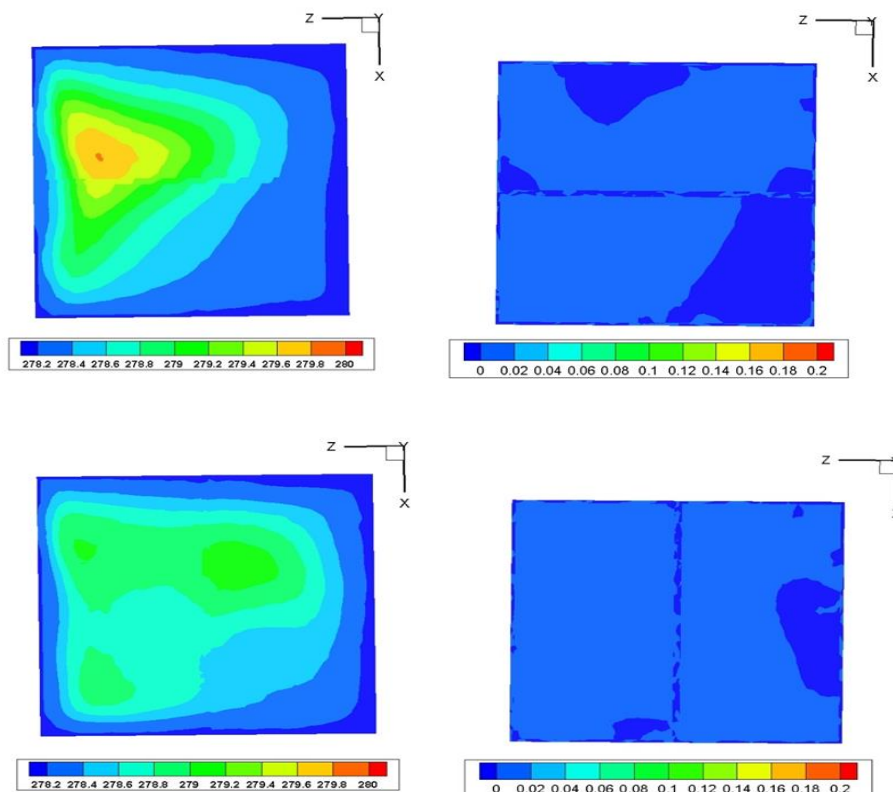
شکل ۴- متوسط دمای ثبت شده (Exp) و شبیه سازی (Smi) در سطوح بالایی (FLP) و پایینی (SLP) در بسته بندی پلاستیک



شکل ۵- خطوط سرعت جریان هوا در صفحه عبور کننده از مرکز دمنده و توده محصول

آن در بسته پلاستیکی باعث می‌شود حفره‌های هوا مانند یک عایق حرارتی عمل کرده و باعث کند شدن روند خنک شدن در محصول درون بسته‌های پلاستیکی می‌شود. شکل (۶) نحوه خنک شدن محصول در بسته بندی پلاستیک را که به صورت لایه ای است، نشان می‌دهد. در سطح نزدیک به کف نسبت به سطح بالایی بسته‌ها، سهم بیشتری از غده‌ها به دمای پنج درجه سلسیوس رسیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در پایین ترین سطح بسته‌ها فرایند خنک شدن یکنواخت تر صورت می‌گیرد و با افزایش ارتفاع توده محصول از این یکنواختی کاسته می‌شود (Chourasia and Goswami, 2006, 2007a; Defraeye *et al.*, 2014; Grubben and Keesman, 2015). دیفری ای<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) نشان دادند که نرخ خنک شدن همه جعبه‌ها در یک ستون به دلیل تغییر سرعت هوا متفاوت است. به طور کلی، حفظ یک‌نواختی سرعت جریان هوا به یک‌نواختی دما می‌انجامد که نیاز به بررسی اثر بسته بندی و نوع بسته بندی دارد. طبق بررسی‌های دیفری ای و همکاران (۲۰۱۵) در ستون بسته‌های پرتقال تفاوت دمایی یک درجه بین بسته‌های هر ردیف وجود دارد.

همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است. متوسط سرعت سیال درون بسته پلاستیکی  $0.01510$  متر بر ثانیه است و حداقل سرعت آن برابر  $10^{-5} \times 3/8968$  متر بر ثانیه و ماکزیمم مقدار آن  $0.03231$  متر بر ثانیه است. خنک سازی به علت کم بودن سرعت هوا، به ویژه در یک توده بزرگ از محصول موجب کاهش سرعت خنک شدن در سطوح بالاتر همچنین باعث خنک شدن ناهمگن بین لایه‌های کیسه‌ها می‌شود (Chourasia and Goswami, 2006; Defraeye *et al.*, 2015). طول مسیر به سرعت، در سرعت کم افزایش می‌یابد. با توجه به زمان تماس طولانی تر محصول و هوای سرد، دمای هوا در سطح اول محصولاتی که آن‌ها را خنک می‌کند، بیش تر شده، که باعث کاهش کارایی خنک کننده هوا در سطوح بعدی محصول می‌شود. این پدیده ناهمگنی را افزایش داده و منجر به اختلاف دمای هوا بین محصول و هوا برای لایه‌های بالا می‌شود که باعث کاهش میزان حذف انرژی در بالاترین سطوح از محصول می‌گردد (Brosnan and Sun, 2001; Chourasia and Goswami, 2006). خنک شدن یکنواخت غده‌ها در یک کیسه به معنی یک دما بودن همه غده‌ها در یک زمان علاوه بر ناهمگنی دما در کل توده، نیز مورد توجه است. عدم جریان سیال و سکون



شکل ۶- الف) خط‌های هم‌دما و هم‌سرعت در بالاترین سطح توده وب) خط‌های هم‌دما و هم‌سرعت در پایین ترین سطح توده بسته بندی پلاستیک

ترتیب در سطح یک و پنج درصد داشت (جدول ۶). توزیع مشابه دما در دو سطح نشان دهنده یکسانی گسترش دما و نفوذ هوا از اطراف بسته‌ها به داخل آن‌ها است، همچنین سرعت کم و یکسان جریان هوا باعث خنک شدن لایه‌ای محصول شده است.

اثر سطح و موقعیت قرار گیری غده‌ها بر کیفیت آن‌ها در سردخانه در دمای ۵ درجه سلسیوس در بسته بندی پلاستیکی سطح قرار گیری محصول بر غلظت قند کل و قند احیا در غده‌های سیب‌زمینی نگهداری شده در بسته‌های پلاستیکی اثر معنی‌دار به

جدول ۶ تجزیه واریانس ( میانگین مربع‌ها) اثر سطح قرار گیری محصول در سردخانه و مدت زمان نگهداری و اثر متقابل سطح قرار گیری محصول در مدت زمان نگهداری بر غلظت قند کل، ساکارز و قند احیا در دمای ۵ درجه سلسیوس بر تغییرات قند کل، ساکارز و قند احیا

درجه آزادی	قند احیا	ساکارز	قند کل
۱	۰/۱۲۶*	۲۳/۳۴**	۲۹/۴۳**
۲	۰/۲۹۷ <sup>ns</sup>	۲۰/۲۰**	۲۷/۹۵**
۲	۰/۲۱۱۷ <sup>ns</sup>	۳/۵۴ <sup>ns</sup>	۳/۹۷ <sup>ns</sup>
۳۰	۰/۰۱۳۳	۳/۱۳	۳/۳۳۲

قند احیا، ساکارز، کاهش وزن بین دو سطح با ارتفاع ۴۲ و ۶۵ سانتی متری از کف سردخانه بسته بندی پلاستیک نشان می‌دهد. توزیع مشابه دما در دو سطح نشان دهنده یکسانی گسترش دما و نفوذ هوا از اطراف بسته‌ها به داخل آن‌ها است، همچنین سرعت کم و یکسان جریان هوا باعث خنک شدن لایه‌ای محصول شده است.

اختلاف معنی دار بین سطح رویی و زیری در بسته‌های پلاستیکی در مقدار قند کل و ساکارز مشاهده نشد اما در مورد قند احیا بین سطوح، اختلاف در سطح پنج درصد معنی‌دار بود، که نشان دهنده حساسیت بالای قندهای احیا تنها به تغییرات دما است. اثر مدت زمان نگهداری بر قند کل و ساکارز معنی‌دار بود. جدول (۷) نتایج آزمون T جفت شده برای مقایسه قند کل،

جدول ۷- نتایج آزمون T جفت شده برای مقایسه قند کل، قند احیا، ساکارز، کاهش وزن بین دو سطح با ارتفاع ۴۲ و ۶۵ سانتی متری از کف سردخانه بسته بندی پلاستیک در هر ۴، ۸ و ۱۲ هفته انبارمانی

هفته	قبل از انبارمانی	۴		۸		۱۲	
فاصله از کف		۴۲	۶۵	۴۲	۶۵	۴۲	۶۵
قند کل (میلیگرم بر گرم)	۲/۷۸	۶/۴۵	۶/۶۴	۳/۶۱	۳/۹۶	۳/۲۲	۳/۰۷
ساکارز (میلیگرم بر گرم)	۲/۱۹	۵/۴۶	۵/۶۳	۳/۰۹	۳/۳۸	۱/۵۴	۳/۰۹
قند احیا (میلیگرم بر گرم)	۰/۵۸	۰/۹۸*	۱/۰۱*	۰/۵۳*	۰/۵۸*	۰/۴۱*	۰/۶۳*

معنی‌داری در سطح یک درصد

جدول ۸- نتایج آزمون میانگین مربعات برای مقایسه قند کل، قند احیا و ساکارز (میلی گرم بر گرم) در صفحات عمودی عبور کننده از سه نقطه با فواصل ۲۲، ۴۴، ۶۶ در هر ۴، ۸ و ۱۲ هفته انبارمانی و ۶۶ سانتی متر از ابتدای توده

فواصل	۴			۸			۱۲		
	۲۲	۴۴	۶۶	۲۲	۴۴	۶۶	۲۲	۴۴	۶۶
قند کل	۱۰/۰۵ <sup>b</sup>	۵/۴۴ <sup>a</sup>	۴/۱۲ <sup>a</sup>	۴/۶۰ <sup>ab</sup>	۳/۷۸ <sup>a</sup>	۲/۹۸ <sup>a</sup>	۵/۹۸ <sup>b</sup>	۱/۵۳ <sup>a</sup>	۱/۲۸ <sup>a</sup>
قند احیا	۸/۵۲ <sup>b</sup>	۴/۶۱ <sup>a</sup>	۳/۴۹ <sup>a</sup>	۳/۹۳ <sup>b</sup>	۳/۲۳ <sup>ab</sup>	۲/۵۴ <sup>a</sup>	۴/۹۷ <sup>b</sup>	۱/۰ <sup>ab</sup>	۰/۸۳ <sup>a</sup>
ساکارز	۱/۵۲ <sup>b</sup>	۰/۸۲ <sup>a</sup>	۰/۶۳ <sup>a</sup>	۰/۶۷ <sup>a</sup>	۰/۵۴ <sup>a</sup>	۰/۴۳ <sup>a</sup>	۱/۱۸ <sup>b</sup>	۰/۲۳ <sup>a</sup>	۰/۲۳ <sup>a</sup>

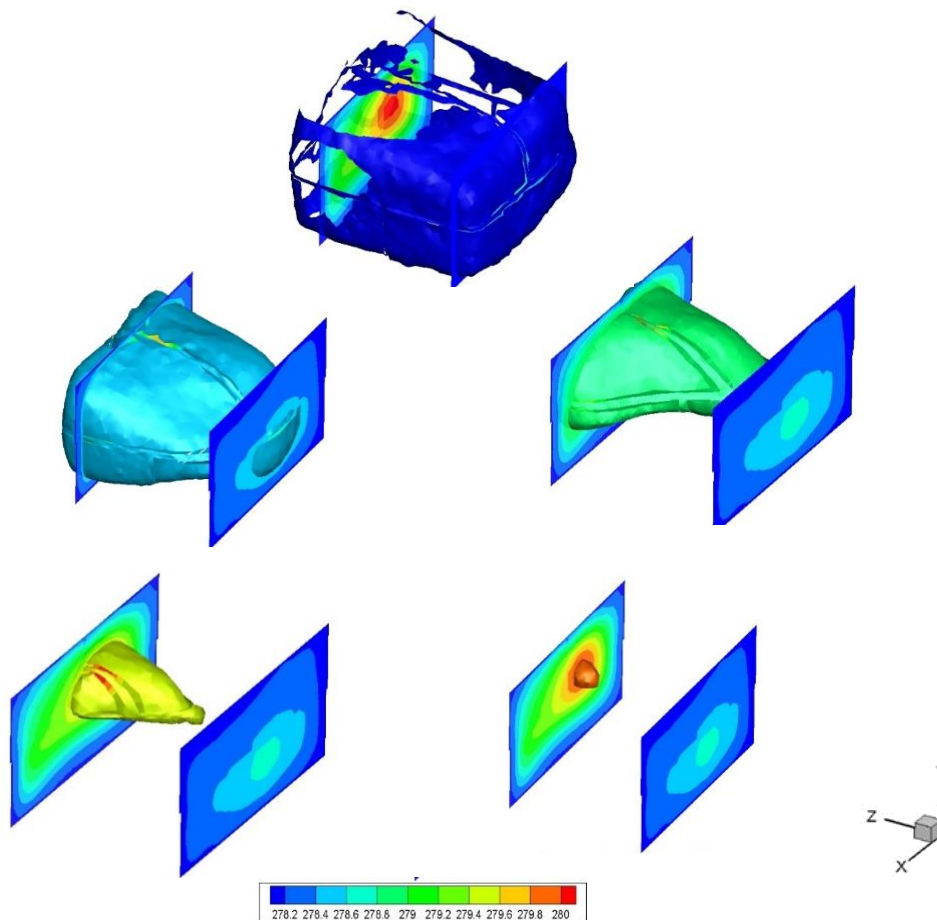
معنی‌داری در سطح یک درصد

فواصل متفاوت از ابتدای توده بین قند کل، قند احیا و ساکارز اختلاف معنی داری وجود دارد، با افزایش فاصله از دیواره‌ی روبه‌روی فن سردخانه که هوای سردتر با سرعت و فشار بیشتر

نتایج آزمون میانگین مربعات بین صفحات عمودی از ابتدای توده (قسمت نزدیک به دیواره سردخانه که هوا با سرعت به توده برخورد می‌کند) محصول نشان می‌دهد، بین صفحات با

برای ارقام پرتقال نشان دادند که ناهمگنی خنک شدن عمدتاً در طول مسیر جریان اتفاق می‌افتد. روند خنک شدن بین ناحیه‌های افقی در یک طرف پالت‌ها و بین ارتفاع‌های مختلف یکنواخت نیست. بسته بندی محصول باعث کاهش میزان خنک شدن و ناهمگونی دما، به ویژه در کارتن‌ها در سمت خروجی پالت یا دور از دیواره‌های سردخانه می‌شود. به طوری که محصول در کارتن‌های روباز، ۲۴٪ (در سمت ورودی پالت) و ۴۲٪ (در سمت خروجی پالت)، سریع‌تر از میوه با اندازه مشابه در کارتن‌های بسته حفره دار ۲ سرد می‌شود. همچنین همین نتایج برای یک بسته نیز نشان داد درون بسته‌ها کشیدگی خط‌های هم‌دما به سمت مرکز سردخانه و نواحی دور از دیواره‌ها است که در مورد کارتن‌های بسته حفره دار این میزان ناهمگونی بیش از کارتن‌های روباز بود. که با نتایج به دست آمده در توده پلاستیکی هم خوانی دارد. همچنین طول پالت باکس‌ها باعث افزایش ناهمگونی دمایی می‌شود (Wu et al., 2018).

به درون بسته‌ها فرستاده می‌شود اختلاف معنی‌دار بین ابتدا و انتهای بسته‌ها در میزان قند وجود دارد (جدول ۸). خنک شدن درون بسته‌ها به صورت لایه‌ای و با کشیدگی در جهت جریان سیال است. به دلیل شیب دمایی به سمت مرکز سردخانه در توده محصول در سطوح ابتدایی که ناشی از سرعت بیشتر هوا در این قسمت است، درصد ماده خشک کمتر در سطوح انتهایی توده مشاهده گردید که موید سرعت کمتر سیال در این ناحیه است که در نتیجه موجب افزایش شدت تنفس و کاهش وزن ناشی از آن شده است. نمای سه بعدی از لایه‌های دمایی در بسته‌ها نشان دهنده نحوه تاثیر جریان سیال بر کاهش دمایی بسته است، همچنین نقاط بحرانی از نظر دما را نشان می‌دهد (شکل ۷). برش‌های با فواصل ۲۰ سانتی‌متر از ابتدا تا انتهای بسته، نامتقارن خنک شدن توده محصول را نشان می‌دهد (شکل ۸) که اثر معنی‌دار بر میزان تجمع انواع قندها داشته است. Wu et al. (2018) در بررسی روند خنک شدن در سردخانه

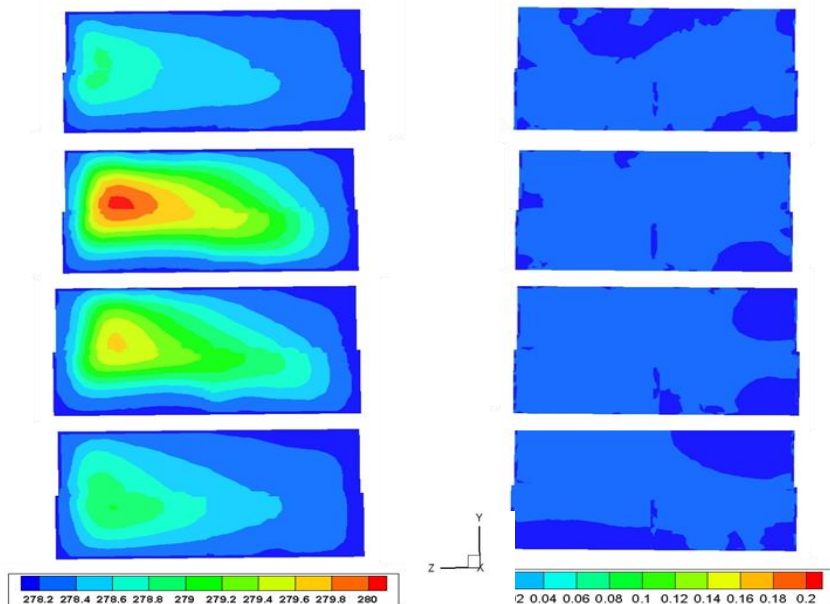


شکل ۷- شبکه سه بعدی از لایه‌های دمایی متفاوت درون توده بسته بندی پلاستیک در دمای ۵ درجه سلسیوس فاصله صفحات ۶۰ سانتی‌متر در راستای Z

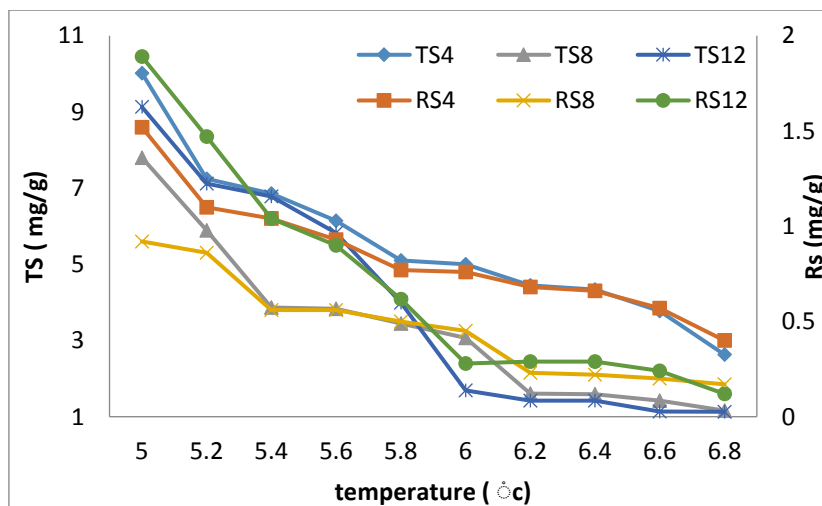
خشک به دست آمد (شکل ۹). که نشان دهنده اثر یکسان ناهمگنی دما بر قند کل در محصول است گرچه اثر مدت زمان نگهداری بر میزان قندهای محلول معنی دار بوده است. نرخ تغییر قندهای محلول به ازای تغییر در یک درجه سانتی گراد در محدوده ۵ تا ۷ درجه سلسیوس به ترتیب برای قند کل، قند ساکارز و قندهای احیایی در بسته بندی پلاستیک برابر ۰/۴۰۷، ۳/۱۵ و ۰/۶۷ میلی گرم بر گرم ماده خشک پیش بینی شد (شکل ۹) جهش نمودارهای قند احیا در شکل ۹ با افزایش مدت انبارمانی شدت بیش تر تغییرات در غلظت قندهای احیایی با افزایش عمر انبارمانی در دماهای پایین تر را نشان می دهد. میزان حساسیت ساکارز به تغییرات دما در طول عمر انبارمانی یکسان باقی مانده است.

### میزان نرخ شیرین شدن در دمای پایین

با انطباق دماهای محدوده های نمونه برداری و میزان قند اندازه گیری شده در نمونه ها، نرخ تغییر در قند کل، ساکارز و قند احیایی به دما در محدوده ۵ تا ۷ درجه سلسیوس بر اثر ناهمگنی دما در بین بسته های پلاستیکی و سطوح قرار گیری آن محاسبه گردید. ضریب همبستگی بین دما و قند کل به طور متوسط برابر ۰/۹۴۳۱ به دست آمد، رابطه دما و میزان قند در مدل پلاستیکی به صورت لگاریتمی پیش بینی شد، که اثر نوسان های دمایی را کاهش می دهد. میزان اختلاف قند کل در گرم ترین و خنک ترین نقاط درون توده محصول با پوشش پلاستیک برای چهار، هشت و دوازده هفته به ترتیب ۷/۳۹، ۶/۶۴ و ۸ میلی گرم بر گرم ماده



شکل ۸- خط های هم دما و هم سرعت در صفحات عمودی توده محصول با بسته بندی پلاستیک



شکل ۹- نمودارهای قند کل (TS) و قند احیا (RS) بر اساس دما در ۴، ۸ و ۱۲ هفته نگهداری

کاهش دهد. موقعیت، نحوه قرار گرفتن بسته‌ها بر جریان سیال و توزیع دما بر روش خنک کردن محصول تأثیرگذار است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری ارزشمند برای بررسی توزیع هوا و دما در سردخانه که با پیش بینی نقاط بحرانی و ناهمگن دمایی به پیش بینی کیفیت محصول و بهبود شرایط نگهداری در طول ذخیره سازی کمک می‌کند. همچنین می‌توان با انطباق داده‌های آزمایشگاهی با نتایج عددی امکان کمی کردن پدیده‌های کیفی در محصول را به وجود آورد که اولین گام برای رسیدن به انبارمانی هوشمند و منحصر به فرد محصول است.

**هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.**

علامت‌ها و اختصارها			
a	محصول	p	هوا
C	فشار (پاسکال)	P	مقاومت داخلی $m^{-1}$
Cp	کسر حجمی	$\gamma$	گرمای ویژه $J kg^{-1}K^{-1}$
d	چگالی ( $kg m^{-3}$ )	$\rho$	ابعاد (متر)
f	تخلخل	$\epsilon$	مخلوط هوا و رطوبت
i	مقاومت ویسکوز	$\alpha$	گونه‌ها
$\rho_r$	چگالی توده سیب‌زمینی	$\rho_{bul}$	چگالی متوسط سیب‌زمینی

**REFERENCES**

Abong, G. O., Okoth, M. W., Imungi, J. K., and Kabira, J. N. (2012). Evaluation of selected Kenyan potato cultivars for processing into potato crisps.

Anderson, B., Sarkar, A., Thompson, J., and Singh, R. (2004). Commercial-scale forced-air cooling of packaged strawberries. *Transactions of the ASAE* **47**, 183.

Anonymous (2016-2015). Ministry of Agriculture statistics. In "Ministry of Agriculture statistics".

Brosnan, T., and Sun, D.-W. (2001). Precooling techniques and applications for horticultural products—a review. *International Journal of Refrigeration* **24**, 154-170.

Chourasia, M., and Goswami, T. (2006). Simulation of transport phenomena during natural convection cooling of bagged potatoes in cold storage, Part I: Fluid flow and heat transfer. *Biosystems engineering* **94**, 33-45.

Chourasia, M., and Goswami, T. (2007a). Steady state CFD modeling of airflow, heat transfer and moisture loss in a commercial potato cold store. *International Journal of Refrigeration* **30**, 672-689.

Chourasia, M., and Goswami, T. (2007b). Three dimensional modeling on airflow, heat and mass transfer in partially impermeable enclosure containing agricultural produce during natural convective cooling. *Energy Conversion and Management* **48**, 2136-2149.

**بحث و نتیجه گیری**

عدم یکسان بودن دما در سردخانه، مقدار قندهای محلول در غده‌های سیب‌زمینی را تغییر می‌دهد. بسته‌های پلاستیکی همواره دمایی بالاتر از دمای ثابت شده برای دمای هوای سردخانه در مرکز بسته‌ها دارند. که سبب ایجاد ترازهای دمایی گسترش یابنده هم دما از سمت مرکز به طرفین توده می‌شود که بر نرخ تنفس محصول در این بسته‌ها تأثیر می‌گذارد. بین دو سطح قرار گیری بسته‌های پلاستیکی اختلاف معنی داری در غلظت قندکل، قند احیا و ساکارز مشاهده نشد اما در میزان درصد کاهش وزن اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد وجود داشت. سطوح متفاوت دمایی در راستای طولی، باعث ایجاد سطوح کیفی متفاوت نیز شده بود به این معنی که با فاصله گرفتن از دیواره و نزدیک شدن به سمت مرکز سردخانه از میزان غلظت قندها در صفحات عمودی فرضی عبوری از توده سیب‌زمینی کاسته شده و متوسط دما افزایش یافته است.

توجه به شرایط هوای اطراف هر محصول به صورت منحصر به فرد می‌تواند کیفیت محصول را در طول عمر ذخیره‌سازی افزایش دهد و احتمال بروز نابسامانی‌های مرتبط با کمبود جریان هوا و نوسان‌های دمایی که مسبب هدر رفت محصول است، را

Chourasia, M., Goswami, T., and Chowdhury, K. (1999). Temperature profiles during cold storage of bagged potatoes: effects of geometric and operating parameters. *Transactions of the ASAE* **42**, 1345-1351.

Datta, A. (2007a). Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of food engineering* **80**, 80-95.

Datta, A. (2007b). Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of food engineering* **80**, 96-110.

Defraeye, T., Cronjé, P., Verboven, P., Opara, U. L., and Nicolai, B. (2015). Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics. *Postharvest Biology and Technology* **108**, 91-101.

Defraeye, T., Lambrecht, R., Delele, M. A., Tsige, A. A., Opara, U. L., Cronjé, P., Verboven, P., and Nicolai, B. (2014). Forced-convective cooling of citrus fruit: cooling conditions and energy consumption in relation to package design. *Journal of food engineering* **121**, 118-127.

Dehghannya, J., Ngadi, M., and Vigneault, C. (2008). Simultaneous aerodynamic and thermal analysis during cooling of stacked spheres inside ventilated packages. *Chemical Engineering & Technology*:



*Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology* **31**, 1651-1659.

- Delele, M. A., Ngcobo, M. E., Opara, U. L., and Meyer, C. J. (2013). Investigating the effects of table grape package components and stacking on airflow, heat and mass transfer using 3-D CFD modelling. *Food and Bioprocess Technology* **6**, 2571-2585.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.* **48**, 89-94.
- FAO (2012). Food and Agriculture Organization (FAO).
- FAO (2015). "World food and agriculture 2015," FAO Statistical.
- Fluent, A. (2011). ANSYS Fluent User's Guide. In "Ansys Inc".
- Galani Yamdeu, J. H., Gupta, P. H., Patel, N. J., Shah, A. K., and Talati, J. G. (2016). Effect of Storage Temperature on Carbohydrate Metabolism and Development of Cold-Induced Sweetening in Indian Potato (*Solanum Tuberosum* L.) Varieties. *Journal of food biochemistry* **40**, 71-83.
- Grubben, N. L., and Keesman, K. (2016). Modelling and control of potatoes in storage facilities.
- Grubben, N. L., and Keesman, K. J. (2015). Modelling ventilated bulk storage of agromaterials: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* **114**, 285-295.
- Guenther, J. F. (1995). Economics of potato storage. *American potato journal* **72**, 493-502.
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., and Meybeck, A. (2011). "Global food losses and food waste," FAO Rome.
- Harral, B., and Boon, C. (1997). Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *Journal of Agricultural Engineering Research* **66**, 221-228.
- Hosseini, Z. (1994). "Common methods of food decomposition," Shiraz University, Iran.
- Kader, A. A. (2002). "Postharvest technology of horticultural crops," University of California Agriculture and Natural Resources.
- Keesman, K. J., Peters, D., and Lukasse, L. J. (2003). Optimal climate control of a storage facility using local weather forecasts. *Control Engineering Practice* **11**, 505-516.
- Kolbe, H., Müller, K., Olteanu, G., and Gorea, T. (1995). Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatments on weight loss and changes in chemical composition of potato tubers stored at 4 C. *Potato Research* **38**, 97-107.
- Kondrashov, V. (2000). Mathematical simulation of the coupled heat and moisture exchange in storehouses of agricultural production. *Mathematische Modellierung des wechselseitigen Wärme-und Wasseraustausches in den landwirtschaftlichen Produktionsspeichern. Heat and mass transfer* **36**, 381-385.
- Liska, D. J., Cook, C. M., Wang, D. D., and Szpylka, J. (2016). Maillard reaction products and potatoes: have the benefits been clearly assessed? *Food science & nutrition* **4**, 234-249.
- Lukasse, L., van Maldegem, J., Dierkes, E., van der Voort, A.-J., de Kramer-Cuppen, J., and van der Kolk, G. (2009). Optimal control of indoor climate in agricultural storage facilities for potatoes and onions. *Control Engineering Practice* **17**, 1044-1052.
- McCready, R., Guggolz, J., Silveira, V., and Owens, H. (1950). Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical chemistry* **22**, 1156-1158.
- Mohammadi, A., Tabatabaeefar, A., Shahin, S., Rafiee, S., and Keyhani, A. (2008). Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy conversion and management* **49**, 3566-3570.
- Mohsenin, N. N. (1970). Physical properties of plant and animal materials. Vol. 1. Structure, physical characteristics and mechanical properties. *Physical properties of plant and animal materials. Vol. 1. Structure, physical characteristics and mechanical properties. 1.*
- Nahor, H., Hoang, M., Verboven, P., Baelmans, M., and Nicolai, B. (2005). CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores. *International Journal of Refrigeration* **28**, 368-380.
- Rahemi, M. (2010). "Postharvest," Fifth/Ed. Shiraz University, Iran.
- Sajadiye, S. M., Ahmadi, H., Hosseinalipour, S. M., Mohtasebi, S. S., Layeghi, M., Mostofi, Y., and Raja, A. (2011). Evaluation of a Cooling Performance of a Typical Full Loaded Cool Storage Using Mono-scale CFD Simulation. *Modern Applied Science* **6**, 102.
- Van Mourik, S., Vries, D., Ploegaert, J. P., Zwart, H., and Keesman, K. J. (2012). Physical parameter estimation in spatial heat transport models with an application to food storage. *Biosystems engineering* **112**, 14-21.
- Versteeg, H., and Malalasekera, W. (1995). Computational fluid dynamics. *The finite volume method.*
- Wu, W., Häller, P., Cronjé, P., and Defraeye, T. (2018). Full-scale experiments in forced-air precoolers for citrus fruit: Impact of packaging design and fruit size on cooling rate and heterogeneity. *Biosystems Engineering* **169**, 115-125.
- Zhao, C.-J., Han, J.-W., Yang, X.-T., Qian, J.-P., and Fan, B.-L. (2016). A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process. *Applied Energy* **168**, 314-331.
- Zou, Q., Opara, L. U., and McKibbin, R. (2006a). A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models. *Journal of Food Engineering* **77**, 1037-1047.
- Zou, Q., Opara, L. U., and McKibbin, R. (2006b). A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods:: II. Computational solution, software development, and model testing. *Journal of Food Engineering* **77**, 1048-1058.