بررسی شیرین‌شدن سیب زمینی در دمای پایین بر اثر ناهمگنی دما در سردخانه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی(CFD)

نعیمه سماواتیان[۱]، سیامک کلانتری*[۱] ، محمد لایقی[۲]، مجتبی دلشاد[۱]
[۱]گروه علوم باغبانی و فضای سبز، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
[۲] دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
*نویسنده مسئول: kalantaris@ut.ac.ir

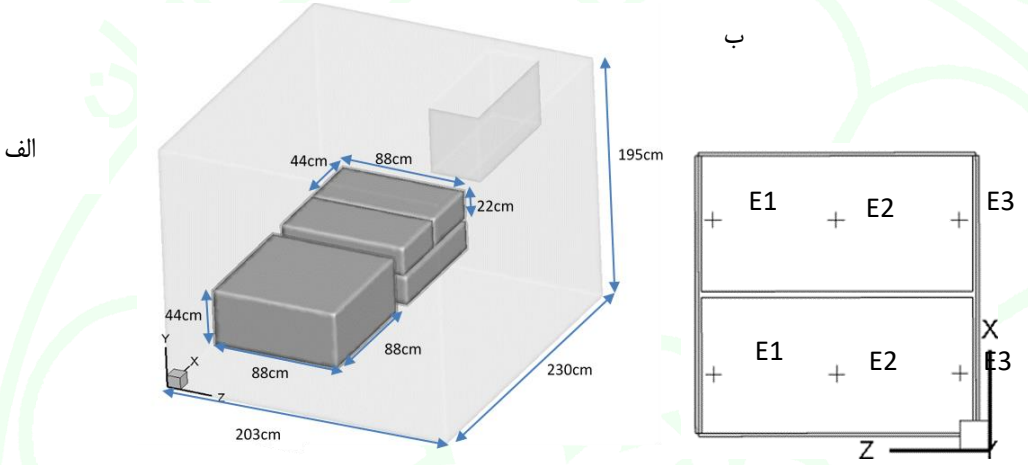
چکیده :
به‌دلیل تأثیر توزیع دما بر کیفیت و کمیت محصول سیب زمینی در سردخانه، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مطالعه توزیع دما در سردخانه و یافتن ترازهای دمایی استفاده شد. در این پژوهش قندکل، قند احیا و ساکارزغده‌های سیب‌زمینی رقم سانته ذخیره شده در ۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی۸۰ % در بسته‌بندی گونی استخراج شد. نتایج نشان داد اختلاف معنی‌داری بین قند کل، قند احیا و ساکارز به دلیل ناهمگنی توزیع دما که منجر به اختلاف ۱ درجه سلسیوس بین گرم‌ترین و سردترین نقاط درون توده محصول شد، وجود دارد. تغییرات در محتوای قندها با ترازهای دمایی شبیه‌سازی شده مطابقت داشت. دینامیک سیالات محاسباتی با بررسی جریان سیال و توزیع دما و نمایش مناطق بحرانی، باعث بهبود روش‌های بسته‌بندی و چیدمان محصول و هدایت بهتر جریان هوا می‌شود.
کلمات کلیدی: بسته‌بندی گونی، دینامیک سیالات محاسباتی، سیب‌زمینی، شبیه‌سازی، قند.

مقدمه

سیب‌زمینی(*Solanum tuberosum* L.) گیاهی از خانواده سولاناسه است که نسبتاً سرما دوست و جزء 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. ایران پنجمین تولید کننده سیب‌زمینی در آسیا با ۵/۲ میلیون تن در سال و سیزدهمین تولید کننده سیب‌زمینی در جهان است. از آن‌جایی که سیب‌زمینی از محصولات زراعی نیمه فاسد شدنی است لذا نیازمند نگهداری در شرایط کنترل شده از نظر دما است (Guenthner, 1995). دامنه دمایی برای نگهداری سیب‌زمینی با توجه به نوع آن و هدف نگهداری بین ۱۵-۴ درجه سانتیگراد و با رطوبت ۸۰ تا ۹۵ ٪ است (Kader, 2002). با این شرایط، سیب‌زمینی را می‌توان بیش‌تر از ۶ ماه در دمای مناسب سردخانه نگهداری کرد. طبق آمار سازمان خواروبار جهان (FAO) در سال ۲۰۱۹ میزان هدر رفت محصولات غده‌ای مانند سیب‌زمینی در کشور ایران در قسمت تولید ۲۰ ٪، در پس از برداشت و انبارداری ۱۰٪، در بسته‌بندی و فرآوری ۱۰ ٪، در شبکه توزیع ۵ ٪ و در زمان مصرف ۵٪ درصد است (Khalid *et al.*, 2019). فرآیندهای بیوشیمیایی که بر کاهش وزن و کیفیت غده‌ها در طول دوره انبارمانی سیب‌زمینی تأثیر می‌گذارد شامل تنفس، از دست دادن آب و جوانه‌زدن است که تحت تأثیر دما قرار دارند. . تنفس یک روش غیرمستقیم 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 به‌عنوان پیش ماده برای تنفس از هیدرولیز نشاسته که سبب کاهش ماده خشک می شوند استفاده می‌شوند (Liska *et al.*, 2016). با سرد کردن محصول نرخ تنفس کاهش می یابد اما برخی واکنش‌ها رفتار کاملا 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 بی تعادلی در سیستم سوخت و ساز حاصل می‌شود و اگر این عمل به اندازه کافی شدید باشد باعث تجمع مواد ناخواسته شده (Rahemi, 2010) و باعث ایجاد شرایطی که به آن شیرین‌شدن دمای پایین (LTS) می‌گویند، می‌شود که به‌دلیل افزایش معنی دار فعالیت بتا آمیلاز و اینورتاز و موازی با آن افزایش میزان قندهای احیای (گلوکز، فروکتوز) و ساکاروز می شود (Galani Yamdeu *et al.*, 2016).
این تحقیق به بررسی تاثیر چگونگی توزیع دما بر تجزیه نشاسته و افزایش قند وکاهش کیفیت غده های سیب زمینی در بسته های گونی در سردخانه می پردازد.

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 سانته در تاریخ ۱۵ آبان به سردخانه منتقل گردید. ابعاد سردخانه ۱/۹۵×۲/۰۳×۲/۳۰ متر است 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 اندازه گیری دمای داخل غده اندازه‌گیری شد، در این روز ۱۶درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و دمای سردخانه به دمای پایه ۵ درجه سانتی‌گراد به حالت ثابت رسیده بود. پیش از انتقال به سردخانه اندازه‌گیری‌های وزن، رنگ گوشت، ماده خشک، وزن مخصوص، مقدار قندهای احیا و نشاسته مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱-الف) فضای سردخانه و محل قرار گیری بسته‌های گونی در سردخانه، ب)محل انتخاب نمونه‌های برای اندازه‌گیری‌های کیفی و کمیE

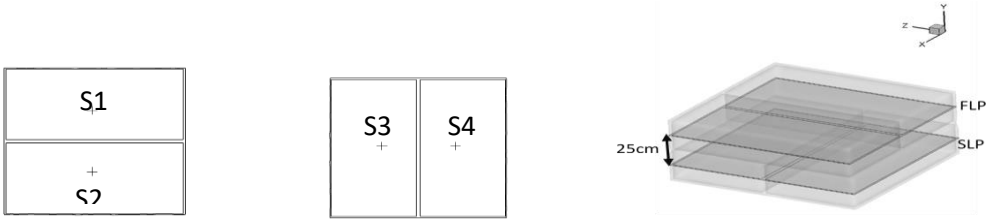
به طور میانگین هر چهار هفته ± ۵ روز پس از اولین روز از قرار گرفتن غده‌ها در سردخانه از هر کیسه سه نمونه از نقاط مشخص شده در شکل ۱ و در سطوح عبور کننده از مرکز کیسه‌ها با فاصله ۲۵ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری وزن مخصوص، ماده خشک، درصد رطوبت، تعداد جوانه، قند محلول، قندغیر احیا، نشاسته، رنگ گوشت و پوست انتخاب شد.

قندهای کل به روش قندهای غیر احیا به روش هندل (۱۹۶۸) اماده شد (Samavatean *et al.*, 2020) و سپس جذب نور هر یک از محلول‌ها در طول موج ۶۲۰ نانومتر با دستگاه مذکورخوانده شد (Van Mourik *et al.*, 2012).

روش‌های شبیه‌سازی: هندسه وگسسته‌سازی مدل‌ها و فرآیند حل معادله‌ها در نرم افزارAnsys Fluent 18 انجام شد. برای دقت شبیه‌سازی از رویه بالادستی مرتبه اول (First order upwind scheme) و برای جفت نمودن فشار–سرعت از الگوریتم SIMPLE و برای مدل اغتشاشی از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر–استوکس رینولدز استفاده گردید. محاسبات با استفاده از کامپیوتر با پردازنده اینتل۷ هسته‌ای با فرکانس پردازش۲/۵ 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 فیزیکی۳۰۰ ثانیه از ابتدای فرآیند، خواص توده متخلخل و معادلات انتقال حرارت بسته‌ها (تنفس) در مدل اعمال گردید. دمای اولیه ۱۶درجه‌سلسیوس و کسر جرمی ۰/۸برای بخار آب در فضای سردخانه به عنوان شرایط اولیه به مدل اضافه گردید. شاخص همگرایی برای مقادیر مطلق باقیمانده به کمتر از 10^{-3} برای پیوستگی، سرعت، کی، اپسلون و کمتر از 10^{-6} برای معادله انرژی اعمال گردید و سپس گام‌های زمانی به ۱۰۰ ثانیه افزایش داده شد و نتایج مربوط به هرگام زمانی ذخیره شد. شبیه‌سازی تا هم‌دما شدن دمای نقاط متناظر با محل قرار گیری سنسورها در بسته‌ها با دمای اندازه‌گیری و ثبت شده در سردخانه ادامه یافت. برای شبیه‌سازی سردخانه مش چهاروجهی با اندازه ۱/۵سانتی‌متر در نظر گرفته شد

تصدیق مدل شبیه‌سازی 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 دقت۰/۰۱ ± ساخت شرکت دانش

بنیان برناتا ایران‌دارای گواهی کالیبراسیون از شرکت سازنده (شرکت برناتا) استفاده گردید. سنسورها در محل‌های مشخص شده در شکل ۲ درون بسته‌ها در سردخانه قرار گرفتند.



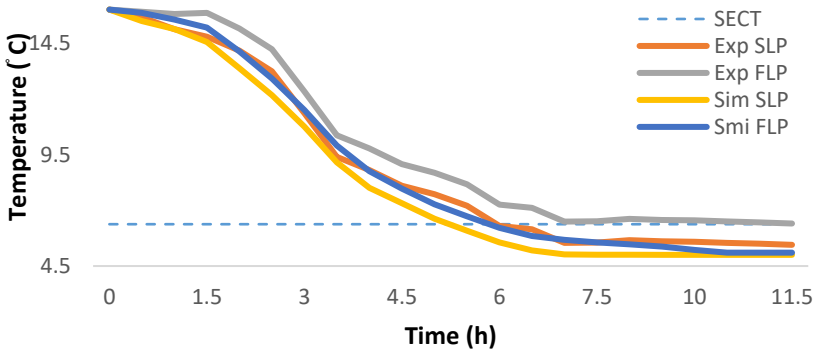
شکل ۲- محل قرار گیری سنسورها درون غده‌ها در مرکز بسته‌ها در سطوح بالایی و پایینی

هر چهار سنسور دما به یک دمانگار چهارکاناله متصل‌شده و به‌وسیله درگاه به مودم متصل گردید داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت آنلاین در سایت شرکت قابل مشاهده، میان‌یابی و ذخیره‌سازی بود. رابطه‌های حاصل از نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری قند درون غده‌ها در کنترل دمایی سردخانه و بسته‌ها برای کاهش میزان نابسامانی شیرین‌شدن بسیار قابل توجه و با اهمیت است.

شناخت عوامل تأثیرگذار بر نابسامانی شیرین‌شدن در محصولات غده‌ای که بر اثر دمای پایین به ویژه در سیب‌زمینی حادث می‌شود و بررسی تغییرات قندهای محلول در تغییرات دمایی و کشف شدت اثر این تغییرات بر کنترل میزان تبدیل مواد به یک‌دیگر، باعث بهبود پروتکل‌های سردخانه‌ای و روش‌های کنترل دما و چیدمان بهینه می‌شود.

نتایج

روند دمایی سرد شدن درون بسته ها در نقاط اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- متوسط دمای ثبت شده و شبیه سازی در سطوح بالایی(FLP) و پایینی (SLP) در بسته‌بندی گونی

اثر سطح و موقعیت قرارگیری غده‌ها بر کیفیت آن‌ها در سردخانه در دمای ۵ درجه سانتیگراد در بسته‌بندی گونی:

فاصله از کف بر تغییرات قند درون غده‌های سیب‌زمینی درون بسته‌های گونی در طول دوره نگهداری اثر معنی‌دار داشت. اختلاف معنی‌دار بین سطح رویی و زیری در بسته‌های گونی در مقدار قند کل ، قند احیا و ساکارز مشاهده شد که نشان‌دهنده حساسیت بالای قندها به تغییرات دما است، جدول ۲. این اختلاف دما را می‌توان منشأ اختلاف میزان قند در دو سطح قرارگیری دانست نتایج مشابه برای بسته‌های نیمه نفوذ پذیر نشان داده است که سطوح با دمایی بیشتر در بسته‌های قسمت‌های بالایی قراردارند (Chourasia and Goswami 2006). با بررسی شبیه‌سازی یک بسته سیب‌زمینی در شرایط انبارهای سنتی نشان دادند که حوزه‌های دمایی متفاوت در

بسته باعث به وجود آمدن یک شیب دمایی از بیرون به سمت مرکز در بسته‌های پلاستیکی می‌شود. درصورتیکه در مورد بسته‌های گونی جابجایی سیال، عامل مهم خنک شدن است (Chourasia and Goswami 2006).

جدول۲- نتایج آزمون T جفت شده برای مقایسه قند کل، قند احیا، ساکارز، کاهش وزن بین دو سطح با ارتفاع ۴۲ و ۶۵ سانتی‌متری از کف سردخانه بسته بندی گونی در ۴، ۸ و ۱۲ هفته انبارمانی

هفته	قبل از انبارمانی	۴		۸		۱۲	
فاصله از کف		۶۵	۴۲	۶۵	۴۲	۶۵	۴۲
قند کل (میلی‌گرم بر گرم)	۲/۷۸	۶/۳۳**	۸/۸۹**	۳/۳۶*	۴/۶۸*	۳/۷۲*	۵/۶۷*
ساکارز (میلی‌گرم بر گرم)	۲/۱۹	۵/۳۵**	۷/۵۴**	۳/۰۹*	۴/۱۵*	۲/۹۹*	۴/۴۲*
قند احیا (میلی‌گرم بر گرم)	۰/۵۸	۰/۹۷*	۱/۳۵*	۰/۵۳*	۰/۸۵*	۰/۷۳*	۱/۲۴*

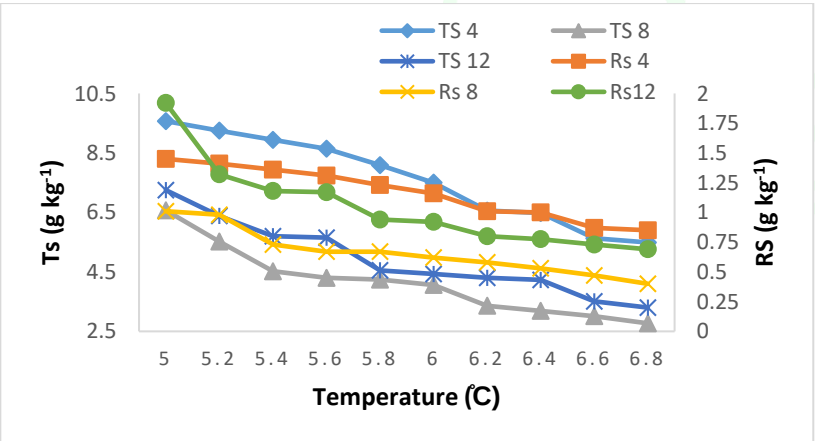
**معنی‌داری در سطح یک درصد، * معنی داری در سطح پنج درصد ، ns عدم معنی داری

میزان نرخ شیرین‌شدن در دمای پایین: با انطباق دماهای محدوده‌های نمونه‌برداری و میزان قند اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها، نرخ تغییر در قند کل، ساکارز و قند احیایی به دما در محدوده ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد بر اثر ناهمگنی دما در بین بسته‌های گونی و سطوح قرارگیری آن محاسبه گردید. ضریب همبستگی بین دما و قند کل به طور متوسط برابر ۰/۹۳۲ به‌دست آمد. که نشان‌دهنده اثر یکسان ناهمگنی دما بر قند کل در محصول است گرچه اثر مدت زمان نگهداری بر میزان قندهای محلول معنی‌دار بوده است. نرخ تغییر قندهای محلول به ازای تغییر در یک درجه سانتی‌گراد در محدوده ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای قند کل، قند ساکارز و قندهای احیایی در بسته‌بندی گونی برابر۴/۴۳، ۳/۵ و ۰/ ۹ میلی‌گرم برگرم ماده خشک پیش‌بینی شد، شکل ۲.

بحث و نتیجه‌گیری

عدم یکسان بودن دما در سردخانه، مقدار قندهای محلول در غده‌های سیب‌زمینی را تغییر می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در پایین‌ترین سطح بسته‌ها فرآیند خنک‌شدن یکنواخت‌تر صورت می‌گیرد و با افزایش ارتفاع توده محصولات از این یکنواختی کاسته می‌شود. خنک‌شدن مرکز توده در بسته گونی می‌تواند روند تبرید را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش اختلاف دمای محصول در مرکز بسته و دمای محیط شود.

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 پیش‌بینی کیفیت محصول و بهبود شرایط نگهداری در طول ذخیره سازی با ارایه راهکارهای برای کنترل شرایط هوای اطراف هر محصول به‌صورت منحصر به فرد امکان افزایش کیفیت محصول را در طول عمر ذخیره‌سازی می دهد و احتمال بروز نابسامانی‌های مرتبط با کمبود جریان هوا و نوسان های دمایی که مسبب هدر رفت محصول است، را کاهش می دهد.



شکل ۲- نمودارهای قند کل(TS) و قند احیا (RS) بر اساس دما در ۴، ۸ و ۱۲ هفته نگهداری

منابع:

FAO, 2015. "World food and agriculture 2015," FAO Statistical.
Galani Yamdeu, J. H., Gupta, P. H., Patel, N. J., Shah, A. K., 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.
Guenthner, J. F. 1995. Economics of potato storage. American potato journal, 72: 493-502.
Kader, A. A. 2002. "Postharvest technology of horticultural crops," University of California Agriculture and Natural Resources.
Khalid, S., Naseer, A., Shahid, M., Shah, G. M., Ullah, M. I., Waqar, A., Abbas, T., Imran, M., Rehman, F. 2019. Assessment of nutritional loss with food waste and factors governing this waste at household level in Pakistan. Journal of Cleaner Production, 206:1015-1024.
Liska, D. J., Cook, C. M., Wang, D. D., Szpylka, J. 2016. Maillard reaction products and potatoes: have the benefits been clearly assessed? Food science & nutrition 4: 234-249.
Rahemi, M. 2010. "Postharvest," Fifth/Ed. Shiraz University, Iran.
Samavatean, N., Kalantari, S., Layeghi, M., Delshad, M. 2020. Temperature Heterogeneity Study in Cold Storage and Its Effect on Low-Temperature Sweetening (LTS) in Potato Using Computational Fluid Dynamics. Iranian Journal of Biosystems Engineering, 51; 485-500.
Van Mourik, S., Vries, D., Ploegaert, J. P., Zwart, H., Keesman, K. J. 2012. Physical parameter estimation in spatial heat transport models with an application to food storage. Biosystems engineering, 112:14-21.

Study low-temperature sweetening (LTS) in potato in cold storage due to Temperature heterogeneity using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Naeimeh Samavateana, Siamak Kalantaria*, Mohammad Layeghib, Mojtaba Delshada
[a] Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran
[b] Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Corresponding author: kalantaris@ut.ac.ir

Abstract
The temperature distribution in the cold room effects of storage methods. Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to study airflow and temperature distribution in storage and to find temperature heterogeneity. Total sugar, reducing sugar and sucrose of potato tubers of Sante variety were extracted at 5 ° C and a relative humidity of 80%. Temperature heterogeneity led to a difference of 2 degrees Celsius between the warmest and coldest points in product mass. The results showed that there was a significant difference between the concentration of total sugars, glucose reducing and sucrose due to temperature distribution heterogeneity. Changes in the content of sugars were matched with simulated temperature levels. The rate of change in the soluble sugars to the temperature was predicted for total sugars, sucrose and sugar regeneration of 4.27, 3.15, 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: Computational Fluid Dynamics, Plastic Packaging, Potato, Simulation, Sugar,