

بررسی تناظر فوریه - رینولدز در تخمین پارامترهای پیش‌خنک‌سازی انار

محمدعلی به‌آئین*، اصغر محمودی و سید فرامرز رنجبر**

* نگارنده مسئول: گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. تلفن: ۳۳۳۹۲۷۷۹ (۰۴۱)،

پایم‌نگار: ali_behaen@yahoo.com

** به ترتیب: دانشجوی دکتری، دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم و دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۱/۲۳

چکیده

مدیریت دما موضوعی مهم در حفظ کیفیت محصولات باغبانی، پس از برداشت، است. یکی از روش‌ها در کنترل مناسب دما، پیش‌خنک‌سازی است که قبل از انبارکردن محصول در سردخانه اجرا می‌شود و عمر قفسه‌ای و مدت زمان انبارمانی میوه‌ها را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر در پیش‌خنک‌سازی، تخمین پارامترهای سردشدن (مدت زمان نیمه و هفت - هشتم سردشدن) به سنسورهای دقیق و صرف وقت نیاز دارد. بنابراین در این تحقیق، سرعت جریان هوا به عنوان عاملی مؤثر در سردشدن انار رقم رباب، در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. پارامترهای فاکتور تاخیر، ضریب سردشدن، مدت زمان‌های نیمه و هفت - هشتم سردشدن بر اساس اطلاعات ثبت شده از سنسورهای دما محاسبه شد. با استفاده از اعداد بی‌بعد فوریه و رینولدز، تخمین مدل‌های رگرسیون برای مدت زمان‌های سردشدن به دست آمد و با داده‌های آزمایش مقایسه گردید. نشان داده شده است که با افزایش سرعت جریان هوا، مدت زمان سردشدن کاهش و ضریب انتقال حرارت همرفتی تا ۵۸/۴۶ درصد افزایش یافته است. نتایج کلی نشان می‌دهد که برای محصولات کروی مثل انار، با استفاده از همبستگی فوریه - رینولدز، مدت زمان سردشدن با دقت مناسب (حداکثر خطا برای زمان‌های نیمه و هفت - هشتم سردشدن به ترتیب ۱۱/۴۶ و ۱۰/۸۳ درصد) و بدون استفاده از معادلات پیچیده، برآورد می‌شود.

واژه‌های کلیدی

انار، پیش‌خنک‌سازی، مدت زمان نیمه و هفت - هشتم سردشدن، همبستگی فوریه - رینولدز

مقدمه

جهان است (Fadavi et al., 2006). انار ایران به دلیل کیفیت مرغوب، از نظر صادرات به خارج از کشور دارای اهمیت اقتصادی فراوان است. با توجه به سطح زیر کشت بالای انار در کشور، مساله نگهداری و کنترل عوامل مؤثر بر کاهش کیفیت این میوه پس از برداشت اهمیت زیادی دارد. یکی از مهمترین فاکتورهای تأثیرگذار در کیفیت محصولات باغبانی پس از برداشت، دماست. دما باعث ایجاد فرایندهای فیزیولوژیکی و بیولوژیکی نامطلوب در میوه می‌شود و در نتیجه کیفیت محصول کاهش می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که به ازای هر ۱۰ درجه

سرد کردن فراورده‌های کشاورزی را پس از برداشت آنها پیش‌خنک‌سازی گویند. پیش‌خنک‌سازی تعریف دقیق و استاندارد ندارد و به طور کلی شامل سردکردن محصول بعد از برداشت تا قبل از حمل و نقل، انبارداری، بسته‌بندی و به عبارتی خنک‌سازی محصول تا حداکثر ۲۴ ساعت بعد از برداشت است (Esna-Aashari et al., 2009). به منظور کاهش تنفس، افزایش عمر انبارداری و حفظ کیفیت فراورده‌های کشاورزی، پیش‌خنک‌سازی این فراورده‌ها ضروری است. ایران بزرگترین تولیدکننده انار در

سرد قرار می‌گیرند (Kader, 2002). طبق استاندارد پیش‌خنک‌سازی انار (استاندارد شماره ۶۴۰۹ سازمان ملی استاندارد ایران)، انار تا دمای ۱۰ درجه سلسیوس باید پس از برداشت خنک شود. در سرد کردن با هوای سرد با جریان اجباری، گرما با روش همرفت بین سیال سردکننده و جسم جامد انتقال می‌یابد (Dincer, 1993; Smale *et al.*, 2006; Zou *et al.*, 2006a,b). عوامل زیادی روی پیش‌خنک‌سازی محصولات تأثیر دارند. در این ارتباط، سرعت هوای سرد یکی از فاکتورهای مؤثر در سردکردن میوه‌ها و سبزی‌هاست (Fikiin, 1983). همچنین نشان داده شده است که در سیستم خنک‌سازی با هوای سرد تحت فشار، سرعت سردشدن در درجه اول به سرعت هوای سرد بستگی دارد که از روی محصول عبور می‌کند و این تنها پارامتر قابل کنترل در بین سایر متغیرهاست؛ عواملی مثل اندازه، شکل و خصوصیات فیزیکی محصول غیرقابل تغییر هستند (Hass *et al.*, 1976; Dennis, 1984). دمای هوای سرد نیز عاملی محدودکننده است و نمی‌توان آن را به پایین‌تر از نقطه‌ای معین، به دلیل ایجاد یخ‌زدگی، کاهش داد. در یک مطالعه گزارش شد که افزایش سرعت هوا از ۰/۲ به ۳/۶۵ متر بر ثانیه، زمان خنک‌شدن محصول کیوی را ۳ تا ۶ برابر، بر اساس نوع بسته بندی، کاهش می‌دهد (Lambrinos *et al.*, 1997). در همین راستا، در پژوهشی دیگر گزارش شد که مدت زمان هفت-هشتم سرد شدن با افزایش دبی جریان هوا از ۰/۰۰۲ به ۰/۰۰۴ مترمکعب بر ثانیه به ازای هر کیلوگرم محصول، ۴۰-۳۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. افزایش در سرعت هوای سرد بالاتر از مقادیر فوق، تأثیر معنی‌داری روی سرعت سرد شدن ندارد (Emond *et al.*, 1996). در یک پژوهش، پیش‌خنک‌سازی یک لایه انگور واریته سولتانا بررسی شد. دمای هوا ۴ درجه سلسیوس و سرعت جریان هوا ۱ و ۲ متر بر ثانیه بود. متغیرهای سردشدن از قبیل فاکتور تأخیر، ضریب

سلسیوس کاهش در دما، تنفس محصول ۴-۲ برابر کاهش می‌یابد (Golob *et al.*, 2002). به منظور حفظ کیفیت و بازارپسندی، لازم است محصول بلافاصله پس از برداشت سرد شود (Brosnan & Sun, 2001). فرایند پیش‌خنک‌سازی، خارج کردن گرمای مزرعه، مرحله‌ای پیچیده از مدیریت دما است که از فسادپذیری و پیری محصول جلوگیری می‌کند و با دستیابی به اهداف فوق کیفیت میوه‌ها و سبزی‌ها را افزایش می‌دهد (Dincer & Dost, 1996). روش‌های مختلفی برای پیش‌خنک‌سازی محصولات وجود دارد که در متغیرهایی مانند طبیعت محصول، نیازهای بسته‌بندی، جریان محصول، مدت زمان خنک‌سازی، تماس آب با محصول، کاهش آب محصول، سرمایه‌گذاری اولیه و کارایی انرژی با هم تفاوت دارند. این روش‌ها شامل خنک‌سازی با هوا، خنک‌سازی در اتاق، خنک‌سازی در خلأ، خنک‌سازی با آب و خنک‌سازی با یخ است (Brosnan & Sun, 2001). سرعت خنک‌سازی با هوای تحت فشار (هوای در حال جریان با فن) ۱۰-۴ برابر بیشتر از سرعت خنک‌سازی در اتاق و نصف سرعت خنک‌سازی با آب است. محدودیت‌های استفاده از این روش، کاهش وزن محصول و طراحی نامناسب سیستم خنک‌کننده است که می‌تواند ناکارایی و هزینه‌های استفاده از این روش را افزایش دهد (Thompson *et al.*, 1998). روش خنک‌سازی با خلأ برای سبزی‌های برگی مانند کاهو و کلم به کار می‌رود که نسبت سطح به حجم در آنها بالاتر است. در روش خنک‌سازی با آب، سرعت سردشدن بالاست ولی محدودیت‌هایی مثل وجود آلودگی و سرایت آن به سایر میوه‌ها وجود دارد. خنک‌سازی با یخ نیز روشی مکمل است که همراه با سایر روش‌های خنک‌سازی به کار می‌رود (Esna-Aashari *et al.*, 2009). متداول‌ترین نوع سرد کردن در محصولات نیمه‌گرمسیری مانند انار، استفاده از هواست که میوه‌ها به طور یکنواخت در معرض هوای

مواد و روش‌ها

انتخاب رقم، نگهداری و آماده سازی

رقم انار رباب (با پوست قرمز، دانه قرمز، طعم ملس، تاج کوتاه، میوه بزرگ، عملکرد زیاد، دیررس، و پوست ضخیم) از باغ‌های انار فاروق شهرستان مرودشت استان فارس در مهرماه ۱۳۹۳ خریداری شد. میوه‌ها، برای جلوگیری از وارد آمدن آسیب به آنها، با دقت و با دست برداشت و در جعبه‌های پلاستیکی به صورت یک ردیف قرار داده شدند. به منظور نگهداری و اجرای تدریجی آزمایش‌ها، انارها تک تک در دستمال کاغذی با ضخامت زیاد و در یخچال در دمای ۵ درجه سلسیوس و در رطوبت نسبی ۸۵ درصد نگهداری شدند. نمونه‌ها، پس از انتقال به آزمایشگاه مهندسی پس از برداشت بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، با ترازوی دیجیتالی با دقت ± 0.01 گرم وزن شدند. قطر انار در سه جهت عمود بر هم و ضخامت پوسته اسفنجی و پوسته بیرونی با کولیس دیجیتالی با دقت ± 0.01 اندازه‌گیری شد. حجم میوه با روش جابه‌جایی با آب محاسبه گردید. چگالی میوه از نسبت وزن به حجم به دست آمد. وزن میوه‌ها و اندازه‌گیری ابعاد آنها پس از اجرای آزمایش‌ها نیز به منظور تعیین اثر سرعت جریان هوای سرد بر این متغیرها اندازه‌گیری شد. برای استفاده از معادلات حاکم بر انتقال حرارت ناپایای کروی، ضریب کرویت در انار با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Mohsenin, 1980):

$$Sphericity = \frac{(abc)^{1/3}}{a} \quad (1)$$

که در آن،

Sphericity = ضریب کرویت (بی‌بعد)؛ a = قطر بزرگ (میلی‌متر)؛ b = قطر متوسط (میلی‌متر)؛ c = قطر کوچک (میلی‌متر) سرعت سرد شدن در مرکز، ۵۰ درصد شعاع انار،

سرد شدن، مدت زمان نیمه و هفت - هشتم سرد شدن آزمایش گردید. نتایج این بررسی نشان داد که متغیرهای ذکر شده وابسته به سرعت جریان هوا هستند و با افزایش سرعت هوا از ۱ به ۲ متر بر ثانیه، مدت زمان نیمه سرد شدن تا $21/8$ درصد مدت زمان هفت - هشتم سرد شدن تا $23/6$ درصد کاهش می‌یابد (Dincer, 1995a). تعیین نمایه دما - زمان، گامی مهم در فرایند خنک‌سازی محصولات کشاورزی است. آهنگ انتقال حرارت نیز می‌تواند به طور مستقیم از تغییرات منحنی‌های زمان - دما به دست آید (Kumar et al., 2008). برای به دست آوردن پارامترهای سرد شدن (مدت زمان نیمه و هفت - هشتم سرد شدن)، باید سنسورهای دما در قسمت‌هایی جایگذاری کرد که این پارامترها باید اندازه‌گیری شوند، و سپس با استفاده از متغیرهای فاکتور تاخیر و ضریب سرد شدن، این زمان‌ها محاسبه گردد. اجرای این عملیات برای محصولات موجود، به خصوص محصولاتی که از نظر شکل تقریباً یکسان هستند (کروی یا استوانه‌ای)، مستلزم صرف هزینه و زمان است. بنابراین پس از آزمایش میوه کروی و به دست آوردن مدت زمان‌های نیمه و هفت - هشتم سرد شدن از طریق محاسبات، در آزمایش‌های بعدی در مورد میوه کروی دیگر می‌توان با استفاده از همبستگی فوریه - رینولدز، مدت زمان‌های نیمه و هفت - هشتم سرد شدن را با تقریب مناسب تخمین زد. تخمین این زمان‌ها ضمن اینکه در طراحی سیستم‌ها و بهبود فرایند خنک‌سازی لازم است، در کاربردهای عملی به افرادی کمک خواهد کرد که در امور فنی و خنک‌سازی محصولات فعالیت دارند.

این تحقیق با هدف محاسبه مدت زمان سرد شدن (نیمه و هفت - هشتم سرد شدن)، تخمین مدت زمان‌های سرد شدن با تناظر فوریه - رینولدز و مقایسه روش آزمایشگاهی (محاسباتی) با روش تخمینی در محصولی کروی شکل، مانند انار، صورت گرفت.

جسم و مکانیزم انتقال گرمای اجباری یا طبیعی تغییر می‌کند. در شکل‌های هندسی پیچیده، برای تعیین این ضریب از روش تجربی استفاده می‌شود. در این تحقیق، ضریب انتقال حرارت همرفتی برای اجسام کروی شکل تکی که در معرض جریان یک نوع گاز (هوا) قرار می‌گیرند، بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (Geankoplis, 1978):

$$h_c = \left(\frac{k_a}{D} \right) \times (2.0 + 0.552 \times Re^{0.53} \times Pr^{0.33}) \text{ for } (1/Re < 48000) \quad (4)$$

که در آن،

h_c = ضریب انتقال حرارت همرفتی (وات بر مترمربع - درجه کلونین)؛ k_a = هدایت حرارتی هوا (وات بر متر - درجه کلونین)؛ D = قطر انار (متر)؛ Re = عدد رینولدز (بدون بعد)؛ Pr = عدد پرانتل (بدون بعد).

مقادیر اعداد پرانتل ۰/۷۱۱، ۰/۷۱۱ و ۰/۷۱۲ و اعداد رینولدز ۲۸۶۰، ۵۶۲۲ و ۷۸۶۸ به ترتیب برای سرعت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه محاسبه شد.

ساخت تجهیزات

سیستم سردکننده با هوای سرد اجباری در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد (شکل ۱). این سیستم از سه قسمت تشکیل شده است: الف- قسمت اجرای آزمایش پیش خنک‌سازی انار شامل تونل هوا به ابعاد ۱/۱۸×۰/۳۵×۱/۳۵ مترمکعب، فن سانتیفریوژ یک وارد (۱۶۰ وات، ۲۲۰ ولت، ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، قطر فن ۳۰×۱۰ میلی‌متر). ب- واحد سردکننده شامل اواپراتور، کندانسور و کمپرسور. ج- واحد پردازش شامل سنسورها و یک رابط ۸ کاناله سنسور که داده‌ها را از سنسور دریافت می‌کند و به واحد پردازش داده‌ها می‌رساند. به منظور استفاده بهینه از انرژی در سرد کردن هوایی که در دستگاه گردش می‌کند، از یک لوله پلی‌اتیلن به قطر ۰/۱۵ متر استفاده شد. سرعت هوا با یک آنوموتر سیم داغ (Lutron-YK, 80AM, Taiwan) اندازه‌گیری

لایه اسفنجی و پوست بیرونی انار بررسی شد. همچنین، رطوبت لایه‌های مورد نظر با گذاشتن نمونه‌ها در آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت بر اساس وزن مرطوب تعیین گردید (AOAC, 1980)، (جدول ۱).

اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارت همرفتی

خصوصیات گرمایی مواد غذایی به میزان بسیار زیاد به رطوبت آنها وابسته است. معادلات ارائه شده برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی (k)، ظرفیت گرمایی ویژه (c_p) که در روابط زیر ارائه شده است، برای همه میوه‌ها و سبزی‌ها و در یک دامنه دمایی بالای منجمد شدن معتبر است و دمای جسم در این معادلات دخالت داده نمی‌شود. ضریب هدایت گرمایی قسمت‌های مختلف انار با استفاده از رابطه سوئیت (Sweet, 1986) محاسبه شد:

$$k = (0.148 + 0.493 \times W) \quad (2)$$

که در آن،

k = ضریب هدایت گرمایی (وات بر متر - درجه کلونین)؛ W = مقدار رطوبتی (اعشاری)

ظرفیت گرمایی ویژه نیز از مدل فیکین (Fikiin, 1983) به دست آمد:

$$c_p = (1.381 + 2.930 \times W) \times 1000 \quad (3)$$

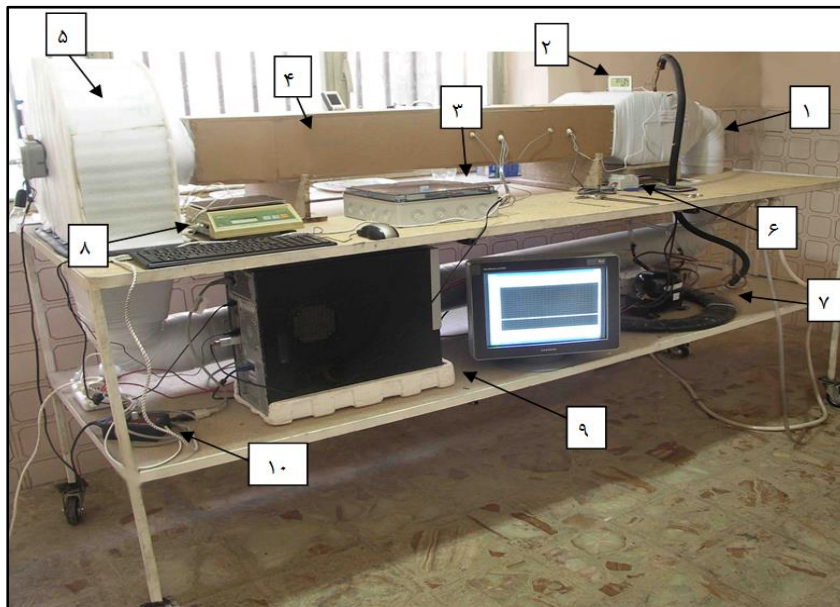
که در آن،

c_p = ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم - درجه سلسیوس)؛ W = مقدار رطوبتی (اعشاری).

ضریب انتقال حرارت همرفتی با نوع شارش (لایه‌ای یا متلاطم)، شکل هندسی جسم، سطح مسیر شارش، خواص فیزیکی شاره، دمای متوسط، مکان مورد نظر در سطح

دقت و به طوری که آب انار خارج نشود، درون نمونه انار مورد آزمایش قرار داده شد. برای ایجاد شرایط آدیاباتیک، محل ورود سنسورها به انار با چسب عایق‌بندی شد. سپس انار مورد نظر درون تونل هوا به گونه‌ای روی پایه قرار داده شد که تمام قسمت‌های انار در معرض هوای سرد قرار گیرد. پس از روشن شدن دستگاه، طبق استاندارد پیش‌خنک‌سازی انار، خنک‌سازی تا دمای ۱۰ درجه سلسیوس در مرکز نمونه انار و در سرعت مورد نظر ادامه داده شد و پس از آن دستگاه خاموش گردید. قبل از هر آزمایش، نمونه آزمایشی در اتاقی با دمای همگن 25 ± 1 درجه سلسیوس قرار داده شد تا تمام قسمت‌های انار از نظر دمایی یکسان گردد. دمای درون تونل هوا در تمام آزمایش‌ها $7/2 \pm 0/1$ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد.

شد؛ با یک دستگاه کنترل تغییرات سرعت فن تعبیه شده در سیستم، سرعت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه برای اجرای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به طراحی دستگاه برای آزمایش روی یک انار تکی، در حد اکثر دور فن، سرعت ۱/۳ متر بر ثانیه به دست آمد و این سرعت به عنوان سرعت بیشینه در نظر گرفته شد. همچنین، دو سرعت پایین‌تر که رابطه‌ای منطقی با سرعت بیشینه داشته و با دستگاه کنترل سرعت نیز هماهنگ باشند، نیز در نظر گرفته شد. یک ترموستات دیجیتالی در سیستم خنک‌کننده تعبیه شد که با روشن و خاموش شدن مداوم، دمای درون کانال در دامنه مورد نظر تنظیم گردید. در شروع هر آزمایش، بر اساس محاسبات، سنسورهایی که از قبل برای قسمت‌های مختلف شماره‌گذاری شده بودند با



شکل ۱- دستگاه پیش‌خنک‌سازی با جریان هوای سرد اجباری

(۱- لوله‌گردش هوا، ۲- نشانگر رطوبت نسبی، ۳- رابط سنسورها، ۴- تونل هوا، ۵- فن سانتریفوژیک وارد، ۶- ترموستات، ۷- سیستم سردکننده، ۸- ترازوی دیجیتال، ۹- واحد پردازش، ۱۰- کنترل کننده سرعت هوا)

یک با دقت $0/1 \pm$ درجه سلسیوس، در یک انار تکی استفاده شد. داده‌های دما در هر ثانیه در برنامه LabView 2010، برای هر سنسور به طور مجزا ثبت شد.

مشخصات سنسورها و ثبت داده‌های دما

سنسورهای مورد استفاده از نوع PT 100 به طول $0/003$ متر، عرض $0/002$ متر و ارتفاع $0/001$ متر، هر

محل قرارگیری سنسورها

دمای بی‌بعد می‌تواند برحسب پارامترهای ضریب سردشدن (C) و فاکتور تاخیر (J) تعریف شود (Thompson et al., 1998).

$$\theta = J \exp(-Ct) \quad (۶)$$

ضریب سردشدن (C)، بیان‌کننده توانایی سردشدن محصول است و از نسبت تغییر دمای فراورده در واحد زمان در هر لحظه (R) به اختلاف دمای میان فراورده و ماده‌خنک‌کننده (ΔT) به دست می‌آید و مقدار آن منفی است. همچنین، این ضریب شیب منحنی سردشدن است (Kumar et al., 2008).

$$C = R / \Delta T \quad (۷)$$

فاکتور تاخیر، بیان‌کننده مقاومت داخلی در برابرانتقال حرارت محصول به اطراف آن است (Dincer, 1995a). این دو پارامتر با برازش داده‌ها در منحنی دمای بی‌بعد و زمان به دست می‌آید. مقدار فاکتور تاخیر (J)، بین ۱ و ۲ در وسط نمونه خنک‌شونده است. سرعت سردشدن با مدت زمان نیمه (H) و مدت زمان هفت-هشتم سردشدن (S) مشخص می‌شود. با قراردادن $\theta = 0.5$ و $\theta = 0.125$ در معادله ۶، مدت زمان نیمه (H) و هفت-هشتم سردشدن (S) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H = [\ln(2J) / C] \quad (۸)$$

$$S = [\ln(8J) / C] \quad (۹)$$

زمان نیمه سردشدن در موارد عملی (Dincer, 1995a) و زمان هفت-هشتم سردشدن در موارد تجاری کاربرد دارد. زمان هفت-هشتم سردشدن نزدیک به دمای مورد نیاز انبار یا حمل و نقل و مساوی سه زمان نیمه سردشدن است (Guillou, 1960). این دو پارامتر مستقل از دمای

پس از اندازه‌گیری دو قطر عمود بر هم در وسط انارهای مورد آزمایش، شعاع دایره وسط انار به دست آمده و سنسورها به این صورت درون انار قرار داده شدند: دو سنسور در مرکز انار، دو سنسور در ۵۰ درصد شعاع، یک سنسور در پوسته اسفنجی و یک سنسور در پوسته بیرونی (سطح انار). دو سنسور نیز قبل و بعد از انار، به منظور کنترل دماهای ورودی و خروجی هوا، نصب شد. داده‌های دریافتی از سنسورها ابتدا به یک رابط ۸ کاناله (قسمت ۳ در شکل ۱) فرستاده و پس از آن در نرم افزار ذکر شده ثبت شد. داده‌های ثبت شده برای تجزیه و تحلیل، به نرم افزار اکسل ۲۰۰۷ منتقل گردید.

فرضیات

- ۱- نمونه‌های آزمایش هوموژن و ایزوتروپ هستند.
- ۲- شرایط آزمایش در حالت انتقال حرارت ناپایا انجام می‌شود.
- ۳- دما در لایه‌های مختلف یکنواخت است.
- ۴- خصوصیات ترموفیزیکی و دمای هوا در تونل ثابت هستند.
- ۵- ضریب هدایت حرارتی، ضریب نفوذ گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه محصول به هنگام آزمایش ثابت‌اند.
- ۶- از گرمای حاصل از تنفس به دلیل سردشدن سریع محصول صرف نظر می‌شود.

با توجه به رابطه ۱، متوسط ضریب کرویت در انارهای مورد آزمایش ۰/۹۵ به دست آمد.

آنالیز داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل فرایند پیش‌خنک‌سازی، محاسبات سردشدن محصول لازم است. دمای بی‌بعد به عنوان نسبت اختلاف دمای لحظه‌ای (T) محصول و دمای هوای خنک‌کننده (T_a) به اختلاف دمای اولیه محصول (T_i) و دمای هوای خنک‌کننده تعریف می‌شود (Dincer, 1995a).

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} \quad (۵)$$

بر اساس تعریف عمومی، عدد فوریه طبق فرمول زیر است:

$$Fo = (\alpha t / R_s^2) \quad (12)$$

که در آن،

Fo = عدد فوریه (بدون بعد)؛ α = ضریب نفوذ حرارتی (مترمربع بر ثانیه)؛ t = زمان (ثانیه)؛ و R_s = بعد مشخصه (متر) بعد مشخصه در رابطه ۱۲، شعاع انار است و از معادله زیر محاسبه می‌شود (Ozisik, 1985):

$$R_s = \frac{V}{A} = \frac{4/3\pi r^3}{4\pi r^2} = \frac{r}{3} \quad (13)$$

که در آن،

R_s = بعد مشخصه (متر)؛ V = حجم (مترمکعب)؛ A = مساحت (مترمربع)؛ r = شعاع انار (متر) است. بعد مشخصه در انارهای مورد آزمایش، ۰/۰۱۴ متر محاسبه شد.

اعداد فوریه جدید برای کاربردهای سرمایه‌ی بر اساس مدت زمان نیمه و هفت-هشتم سرد شدن به صورت زیر است:

$$Fo_H = (\alpha H / R_s^2) \quad (14)$$

که در آن،

Fo_H = عدد فوریه بر اساس مدت زمان نیمه سرد شدن (بدون بعد)؛ α = ضریب نفوذ حرارتی (مترمربع بر ثانیه)؛ H = مدت زمان نیمه سرد شدن (ثانیه)؛ R_s = بعد مشخصه (متر) است.

$$Fo_S = (\alpha S / R_s^2) \quad (15)$$

که در آن،

Fo_S = عدد فوریه بر اساس مدت زمان هفت - هشتم سرد شدن (بدون بعد)؛ α = ضریب نفوذ حرارتی (مترمربع

اولیه محصول هستند و به هنگام خنک کردن محصول ثابت خواهند ماند، به این معنا که اگر در محصولی دو ساعت زمان لازم باشد تا اختلاف دمای محصول و هوای سرد به ۵۰ درصد مقدار اولیه برسد (H)، دو ساعت دیگر زمان لازم خواهد بود تا اختلاف دمای جدید محصول و هوای سرد به ۲۵ درصد مقدار اولیه برسد ($2H$)، و باز هم دو ساعت دیگر زمان لازم خواهد بود تا اختلاف دمای جدید محصول و هوای سرد به ۱۲/۵ درصد مقدار اولیه برسد ($3H$). مجموع سه زمان نیمه سرد شدن، معادل زمان هفت - هشتم سرد شدن است. بنابراین، روند گفته شده هیچ ارتباطی با دمای اولیه محصول نخواهد داشت.

افت وزن میوه

یکی از محدودیت‌های استفاده از پیش‌خنک‌سازی با هوای سرد اجباری، احتمال از دست دادن آب محصول است. برای ارزیابی کاهش وزن محصول به واسطه از دست دادن آب، این پارامتر بر اساس معادله زیر در سرعت‌های مختلف هوای سرد در انارهای تکی با ترازی دیجیتالی با دقت $\pm 0/01$ بررسی شد. درصد کاهش وزن از نسبت تفاضل وزن اولیه (W_i) و ثانویه (W_f) به وزن اولیه به دست می‌آید.

$$\text{درصد کاهش وزن} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (10)$$

ساختار مدل

عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (11)$$

که در آن،

Re = عدد رینولدز (بدون بعد)؛ V = سرعت میانگین (متر بر ثانیه)؛ d = قطر میوه (متر) و ν = ویسکوزیته سینماتیک (مترمربع بر ثانیه) است.

رگرسیون گرفته شد. بنابراین، تناظرهای جدید برای تخمین مدت زمان‌های نیمه و هفت-هشتم سرد شدن با هوا در دامنه رینولدز قابل قبول (جدول ۶ و ۷) به دست خواهد آمد. در نتیجه، اگر ابعاد محصول و سرعت جریان هوای سردکننده مشخص باشد، پس از محاسبه عدد رینولدز، عدد فوریه برای مدت زمان‌های نیمه و هفت-هشتم سرد شدن قابل محاسبه است. پس از وارد کردن ضریب نفوذ حرارتی در معادلات (۱۴ و ۱۵)، مدت زمان‌های نیمه و هفت-هشتم سرد شدن از این معادلات به دست می‌آید.

نتایج

بررسی مقدار رطوبت در لایه های مختلف انار

در جدول ۱ مشاهده می شود که بیشترین مقدار رطوبت (۸۱/۷۸ درصد) در دانه و کمترین مقدار رطوبت (۶۶/۴۸ درصد) در پوسته بیرونی انار وجود دارد. در جدول ۲ نیز خواص ترموفیزیکی انار آورده شده است.

جدول ۱- میزان رطوبت در لایه‌های مختلف رقم انار مورد آزمایش

رقم انار	رطوبت پوسته بیرونی (درصد)	رطوبت پوسته اسفنجی (درصد)	رطوبت دانه (درصد)
رباب	۶۶/۴۸	۷۹/۵۶	۸۱/۷۸

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی رقم انار مورد آزمایش

رقم انار	ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم-درجه سلسیوس)	هدایت گرمایی (وات بر متر-درجه کلونین)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
رباب	۳۶۰۶/۰۷	۰/۵۲	۹۷۰

بررسی افت وزن میوه

در پیش‌خنک‌سازی با هوای سرد اجباری برای محصولات، نکته‌ای که باید توجه داشت کاهش وزن میوه است. بنابراین، افت وزن میوه در سرعت‌های

مختلف جریان هوای سرد بررسی و برابر جدول ۳ مشخص شد که کاهش وزن در اثر جریان هوای سرد در سرعت‌های مختلف ناچیز است و بنابراین از این متغیر در تجزیه و تحلیل فرایند سرد شدن صرف‌نظر شد.

جدول ۳- درصد کاهش وزن در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد

کاهش وزن (درصد)	وزن نهایی (گرم)	وزن اولیه (گرم)	سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)
۰/۲۲	۳۳۳/۳۹	۳۳۴/۱۳	۰/۵
۰/۲۱	۳۴۶/۷۴	۳۴۷/۴۶	۱
۰/۱۶	۳۵۴/۹۰	۳۵۵/۴۷	۱/۳

بررسی فاکتور تاخیر

در آزمایش‌های انجام شده با انار رقم رباب، در هر سرعت مجزا (۰/۵، ۱، ۱/۳ متر بر ثانیه)، میزان فاکتور تاخیر کاهش پیدا کرد. بیشترین مقدار فاکتور تاخیر در مرکز انار و به میزان ۱/۱۷۴۹، ۱/۲۰۳۳ و ۱/۱۶۱۸ به دست آمد که نشان دهنده مقاومت داخلی به انتقال حرارت در محصول است. آزمایش‌های دینسر (Dincer, 1995a) روی پیش‌خنک‌سازی انگور نیز نشان می‌دهد که فاکتور تأخیر بزرگتر از ۱ باعث ایجاد مقاومت داخلی در برابر انتقال حرارت در محصول می‌شود. در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه، مقدار فاکتور تاخیر در لایه بیرونی ۰/۸۶۸۵ و کمترین مقدار این فاکتور است. از طرفی، میزان ضریب نفوذ حرارتی لایه بیرونی ($10^{-7} \times 1/253$ مترمربع بر ثانیه) نسبت به میزان ضریب نفوذ حرارتی لایه اسفنجی و لایه دانه کمترین مقدار است. انتظار می‌رفت با توجه به کمتر بودن مقدار ضریب نفوذ حرارتی لایه بیرونی، مقاومت این لایه نسبت به انتقال گرما زیاد و مقدار فاکتور تاخیر آن بیشتر باشد. فاکتور تاخیر به خصوصیات حرارتی و از جمله ضریب نفوذ حرارتی مرتبط است. ضریب نفوذ حرارتی با ضریب هدایت حرارتی نسبت مستقیم و با حاصل ضرب ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی نسبت عکس دارد. بنابراین، ضریب هدایت حرارتی بالاتر نشان دهنده این است که ضریب نفوذ حرارتی در ماده بیشتر است. با توجه به رابطه (۲)،

مقدار رطوبت بیشتر در ماده باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی و در نتیجه ضریب نفوذ حرارتی بیشتر می‌شود. بنابراین، با توجه به اینکه در مرکز جسم رطوبت بیشتر و ضریب هدایت حرارتی نیز بیشتر است، ضریب نفوذ حرارتی افزایش یافته که انتظار می‌رود افزایش این ضریب نیز باعث شود فاکتور تاخیر در مرکز کمتر باشد. همین استدلال در مورد بقیه لایه‌ها (پوسته اسفنجی و پوسته بیرونی) نیز صادق است. با اینحال، نکته دیگری که باید مدنظر داشت مقاومت گرمایی است که جسم از خود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه لایه بیرونی در معرض مستقیم جریان هوای سرد قرار دارد، کمترین مقاومت گرمایی را به انتقال حرارت از خود نشان داده و بنابراین کمترین میزان فاکتور تاخیر را هم به خود اختصاص داده است. ضریب نفوذ حرارتی در لایه اسفنجی، $10^{-7} \times 1/327$ مترمربع بر ثانیه، از مقدار این ضریب در لایه بیرونی بیشتر است. ضریب نفوذ حرارتی در لایه دانه و از جمله مرکز محصول، $10^{-7} \times 1/339$ مترمربع بر ثانیه است. با توجه به افزایش ضریب نفوذ حرارتی از لایه بیرونی به طرف مرکز انار، انتظار می‌رود که میزان انتقال حرارت بیشتر باشد، ولی مقاومت گرمایی لایه‌های انار که از لایه بیرونی به مرکز بیشتر می‌شود، انتقال حرارت را کاهش می‌دهد و بنابراین با توجه به جدول ۴ هر چه از لایه بیرونی به لایه اسفنجی و مرکز نزدیک‌تر می‌شویم، فاکتور تاخیر بالاتر می‌رود.

بررسی ضریب سردشدن

این ضریب شاخصی از توانایی سرمایش محصول و شیب منحنی سردشدن است (Dincer, 1995a). ضریب سردشدن به پارامترهای زیر نیز ارتباط دارد (Ozisik, 1985):

$$C = \frac{Ah}{\rho c_p V} \quad (17)$$

که در آن،

C = ضریب سردشدن (ثانیه/۱)؛ A = سطح تماس با جریان هوا (مترمربع)؛ h = ضریب انتقال حرارت همرفتی (وات بر مترمربع - درجه کلوین)؛ ρ = چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ و V = حجم (مترمکعب) است.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، ضریب سردشدن به طور سیستماتیک با تغییر سرعت جریان هوا تغییر می‌کند و ضرایب تبیین در لایه‌ها و سرعت‌های مختلف، بین دمای بی‌بعد و زمان بیشتر از ۹۰ درصد است. مقادیر ضریب سردشدن به اندازه محصول و سطحی که در معرض هوای سرد قرار می‌گیرد، حساس هستند. پارامترهای سردشدن (مدت زمان نیمه و هفت - هشتم سردشدن) که در منابع از آنها به آهنگ سردشدن یاد می‌شود، بستگی زیادی به ضریب سردشدن دارند (Ngcobo, et al., 2013). در سرعت‌های آزمایش صورت گرفته، هر چه از مرکز انار به لایه اسفنجی و بیرونی نزدیک‌تر می‌شویم، ضریب سردشدن بالاتر می‌رود. در تمام سرعت‌های جریان هوای سرد، کمترین مقدار ضریب سردشدن مربوط به مرکز و بیشترین مقدار مربوط به لایه بیرونی انار است؛ دلیل عمده آن این است که سطح لایه بیرونی در معرض جریان هوای سرد قرار دارد. با توجه به

جدول ۴، در سرعت ۰/۵، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه، افزایش ضریب سردشدن از مرکز به لایه بیرونی به ترتیب ۱۴/۲۹، ۳۸/۷۰ و ۷۰/۹۷ درصد است. لایه بیرونی نیز از سرعت ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، ۶۵/۶۳ درصد افزایش را در ضریب سردشدن نشان می‌دهد. در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد (۰/۵، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه)، از مرکز به لایه بیرونی مدت زمان نیمه و هفت-هشتم سردشدن کاهش می‌یابد. دلیل اصلی آن کم شدن فاصله شعاع انار از مرکز نسبت به جریان هوای سرد و کاهش مقاومت لایه‌ها همراه با افزایش شعاع انار است. بررسی لایه‌های یکسان در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد که حتی در جاهایی که کاهش درصد فاکتور تاخیر مشاهده می‌شود، ضریب سرد شدن با سرعت بیشتری افزایش پیدا کرده است. تاثیر زیاد ضریب سرد شدن روی کاهش مدت زمان سرد شدن به طور مستقیم به افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی در سرعت‌های بالاتر وابسته است (جدول ۵). با توجه به رابطه ۱۷، در انار بخصوص مورد آزمایش، تمام پارامترها ثابت اما فقط ضریب انتقال حرارت همرفتی متغیر است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر با یافته‌های حاصل از تحقیق اوزیشیک (Ozisik, 1985) مطابقت دارد.

با افزایش سرعت جریان هوای سرد، از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، مدت زمان نیمه سردشدن ۱۰/۸۶ درصد در مرکز و ۱۷/۶۴ درصد در لایه بیرونی و نیز مدت زمان هفت-هشتم سردشدن ۱۰/۱۳ درصد در مرکز و ۳۳/۳۶ درصد در لایه بیرونی کاهش یافته است. طبق گزارش دینسر (Dincer, 1995b)، دو مدت زمان یاد شده به مقدار زیاد به ضریب سردشدن وابسته است. نتایج آزمایش‌های حاصل از این تحقیق با نتایج گزارش فوق مطابقت دارد.

جدول ۴- پارامترهای پیش خنک‌سازی در مرکز و پوست انار در سرعت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه

$$V = 0.5 \text{ m s}^{-1} \text{ (a)}$$

محل استقرار سنسور	J	C(s ⁻¹)	H(s)	S(s)	R ²	E* (درصد)
مرکز	۱/۱۷۴۹	۰/۰۰۰۲۸	۳۰۵۱/۱۸	۸۰۰۲/۲۳	۰/۹۹۳۶	۳/۲۷
۵۰٪ شعاع انار	۱/۰۰۶۹	۰/۰۰۰۳۱	۲۲۵۸/۱۴	۶۷۳۰/۰۶	۰/۹۹۹۶	۰/۸۸
پوست اسفنجی	۰/۹۹۵۹	۰/۰۰۰۳۳	۲۰۸۷/۱۰	۶۲۸۸/۸۹	۰/۹۹۹۴	۱/۴۰
پوست بیرونی	۰/۸۶۸۵	۰/۰۰۰۳۲	۱۷۲۵/۵۰	۶۰۵۷/۶۷	۰/۹۹۶۴	۲/۹۹

$$V = 1 \text{ m s}^{-1} \text{ (b)}$$

محل استقرار سنسور	J	C(s ⁻¹)	H(s)	S(s)	R ²	E* (درصد)
مرکز	۱/۲۰۳۳	۰/۰۰۰۳۱	۲۸۳۲/۹۵	۷۳۰۴/۸۷	۰/۹۹۵۵	۳/۳۵
۵۰٪ شعاع انار	۰/۹۷۶۱	۰/۰۰۰۳۳	۲۰۲۷/۱۴	۶۲۲۸/۰۳	۰/۹۹۹۴	۲/۰۶
پوست اسفنجی	۰/۹۴۶۱	۰/۰۰۰۳۶	۱۷۷۱/۵۰	۵۶۲۲/۳۲	۰/۹۹۹۱	۲/۰۹
پوست بیرونی	۰/۹۴۵۰	۰/۰۰۰۴۳	۱۴۸۰/۴۱	۴۷۰۴/۳۵	۰/۹۹۷۵	۰/۹۵

$$V = 1/3 \text{ m s}^{-1} \text{ (c)}$$

محل استقرار سنسور	J	C(s ⁻¹)	H(s)	S(s)	R ²	E* (درصد)
مرکز	۱/۱۶۱۸	۰/۰۰۰۳۱	۲۷۱۹/۷۳	۷۱۹۱/۶۵	۰/۹۹۳۶	۳/۳۴
۵۰٪ شعاع انار	۱/۰۱۸۲	۰/۰۰۰۴۱	۱۷۳۴/۵۹	۵۱۱۵/۸۰	۰/۹۹۸۹	۱/۹۵
پوست اسفنجی	۰/۹۱۳۵	۰/۰۰۰۴۱	۱۴۶۹/۹۴	۴۸۵۱/۱۵	۰/۹۹۷۱	۳/۰۲
پوست بیرونی	۱/۰۶۱۹	۰/۰۰۰۵۳	۱۴۲۱/۱۵	۴۰۳۶/۷۹	۰/۹۹۱۳	۶/۴۷

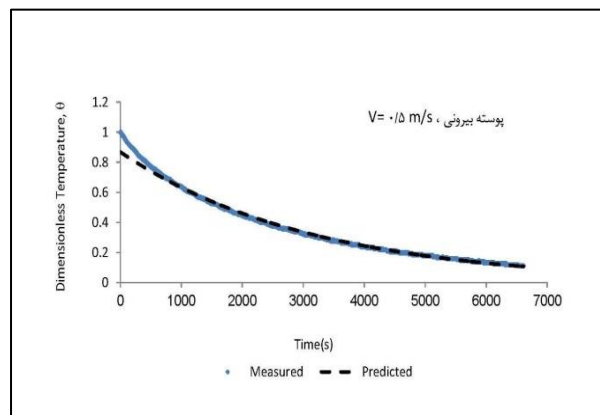
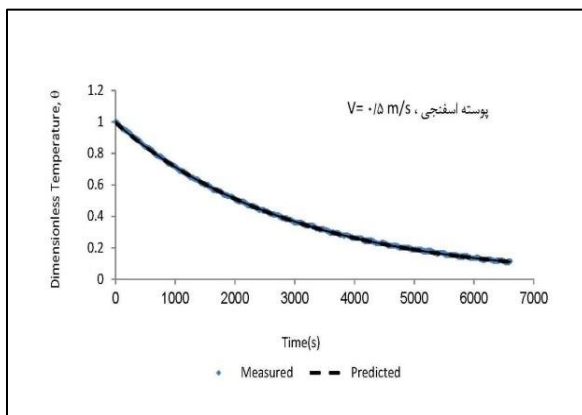
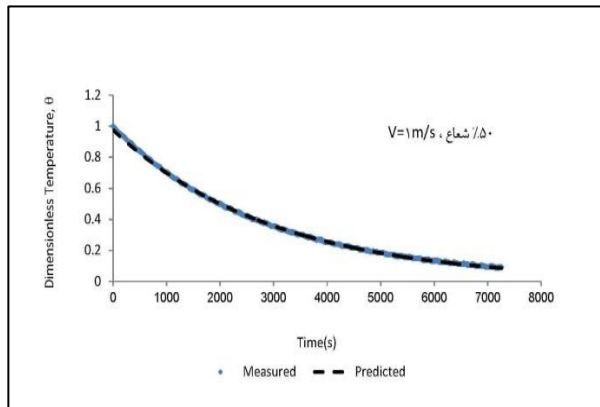
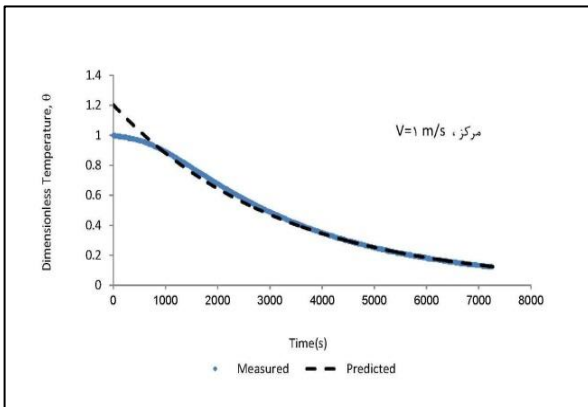
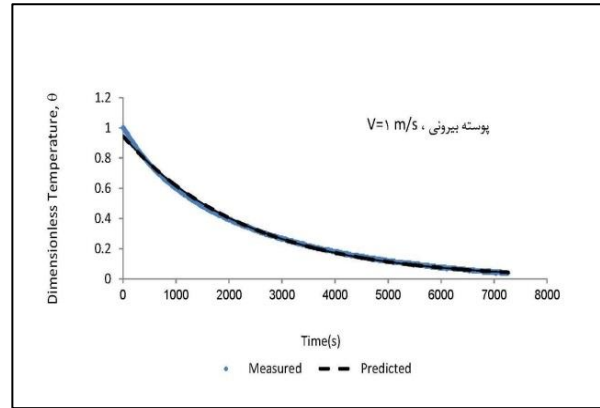
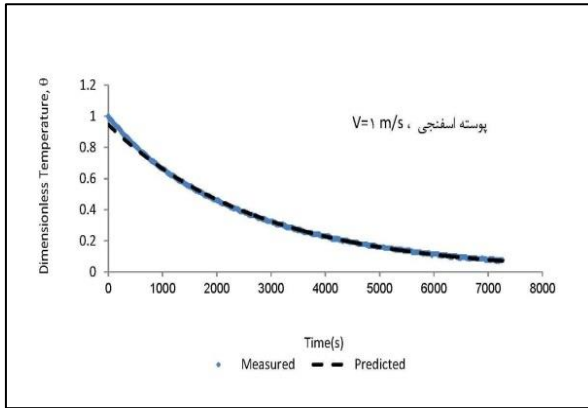
J=فاکتور تاخیر، C=ضریب سردشدن، H=مدت زمان نیمه سردشدن، S=مدت زمان هفت-هشتم سردشدن
*حداکثر اختلاف بین داده‌های آزمایش و رگرسیون

حساسیت بیشتری از خود نشان داده است که باید در فرایند پیش‌خنک‌سازی مد نظر قرار گیرد. بعد از ۵۰۰۰ (ثانیه)، تغییرات سرعت جریان هوای سرد اثر کمی در کاهش دمای مرکز و پوست انار دارد. این نتایج با گزارش‌های سایر محققان (Kumar et al., 2008) مطابقت دارد. حداکثر اختلاف بین داده‌های آزمایش و رگرسیون در مرکز و پوست انار به ترتیب ۳/۳۵ و ۶/۴۷ درصد و پذیرفتنی است. این مقدار اختلاف در مدت زمان‌های اولیه سردشدن (۵۰۰-۰ ثانیه) و در فاکتورهای تأخیر بالا (بیشتر از ۱) اتفاق افتاده که بیانگر مقاومت داخلی در برابر انتقال حرارت از جریان هوا به محصول است (Dincer, 1995a). شروع سردشدن در مرکز انار با تأخیر زمانی شروع می‌شود که باعث خواهد شد ابتدای

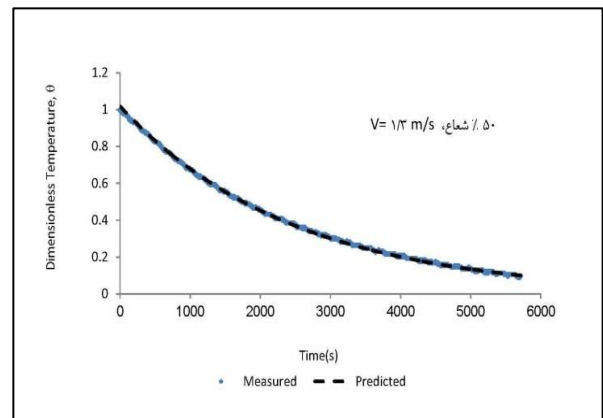
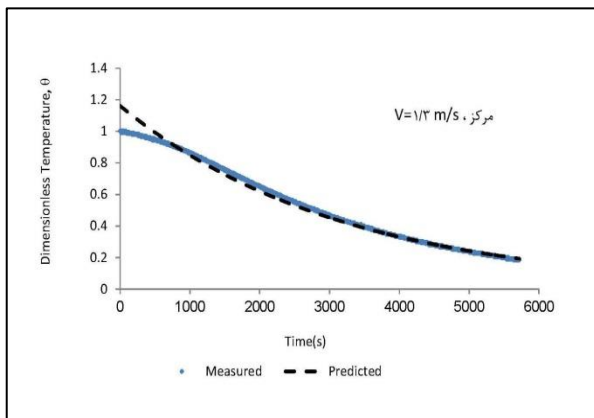
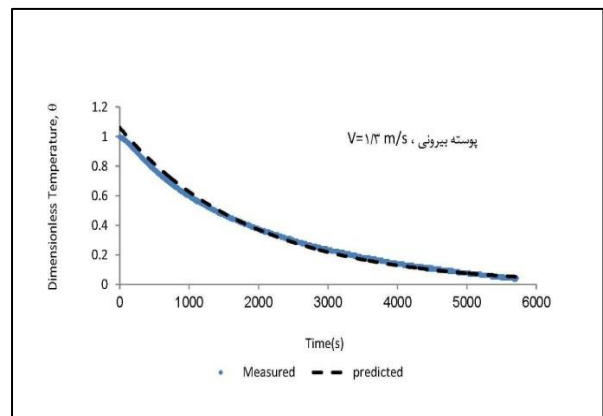
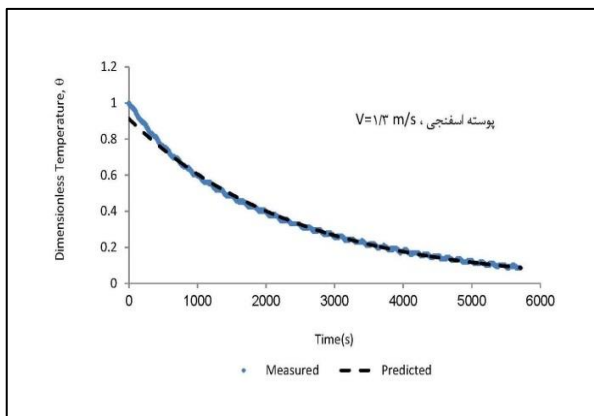
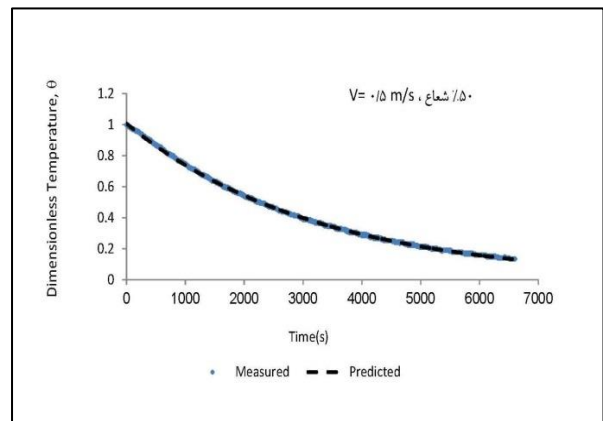
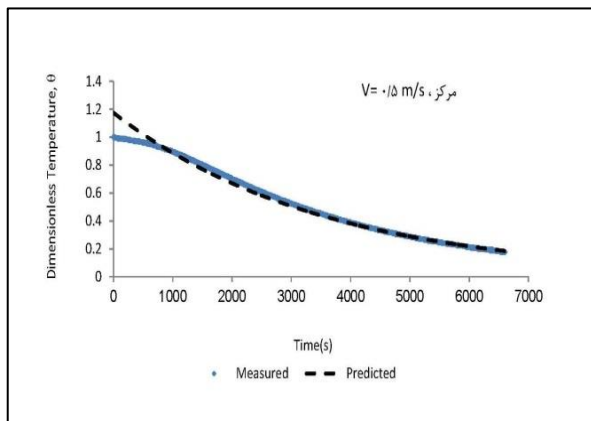
منحنی‌های سردشدن (الگوی سردشدن) انار در لایه‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. در تمامی منحنی‌ها، هر چه به پایان فرایند خنک‌سازی نزدیک‌تر می‌شویم، شیب منحنی‌ها کاهش بیشتری پیدامی‌کند. به عبارت دیگر، در زمان‌های پایانی خنک‌سازی، به علت کمترشدن اختلاف بین دمای مرکز و پوست انار با دمای هوای سرد، کاهش دما کندتر خواهد بود. دمای بی‌بعد (θ)، کمتر از ۰/۲ در سرعت‌های مختلف تأثیر کمی در سرعت سردشدن مرکز انار داشته است. با این حال سرعت سردشدن در پوست (لایه بیرونی) در دمای بی‌بعد کمتر از ۰/۱ تأثیر کمی از خود به جای گذاشته است. این نکته بیانگر این است که در فرایند انتقال حرارت، مرکز محصول نسبت به پوست میوه

که هوای سرد از پایین جعبه وارد می‌شود، مرکز سیب‌زمینی‌هایی که نسبت به هوای سرد در لایه‌های بالاتر قرار داشتند، با تأخیر زمانی سرد شدند (Lindsay et al., 1983).

منحنی سرد شدن نسبت به قسمت‌های پایین مسطح باشد. دلیل این موضوع، فاصله مرکز انار از هوای سرد در زمان خنک‌شدن محصول است. یافته‌های یک پژوهش نیز نشان می‌دهد که در جعبه‌ای با ۵ لایه سیب‌زمینی



بررسی تناظر فوریه - رینولدز در تخمین پارامترهای...



شکل ۲- نمودارهای سرد شدن (آزمایشی و رگرسیون) در قسمت‌های مختلف اثار

(مرکز، ۵۰ درصد شعاع، پوسته آسفنجی، پوسته بیرونی، Measured: اندازه‌گیری شده، Predicted: پیش‌بینی شده)

محصول وابسته به افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی است که آن نیز به نوبه خود بر اثر تغییر در سرعت جریان هوای سرد تغییر می‌یابد. با افزایش سرعت جریان هوای

اثر سرعت جریان هوای سرد بر ضریب انتقال حرارت همرفتی افزایش انتقال حرارت (افزایش خنک‌سازی) در

هوای سرد عاملی مهم در تغییر ضریب انتقال حرارت همرفتی و در نتیجه افزایش سرعت انتقال حرارت است. بر این اساس، با افزایش سرعت جریان هوای سرد از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، ضریب انتقال حرارت همرفتی ۵۸/۴۶ درصد افزایش پیدا کرده است (جدول ۵).

سرد از ۰/۵ به ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه، ضریب انتقال حرارت از ۱۱/۰۵ به ۱۵/۷۵ و ۱۷/۵۱ وات بر مترمربع - درجه کلون افزایش یافته‌است. با توجه به اینکه اندازه و دمای انارهای مورد آزمایش و دمای جریان هوای سرد تقریباً یکسان بوده‌است، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت جریان

جدول ۵- ضریب انتقال حرارت و عدد رینولدز در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد

عدد رینولدز (بی‌بعد)	ضریب انتقال حرارت همرفتی (وات بر مترمربع - درجه کلون)	سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)
۲۸۶۰	۱۱/۰۵	۰/۵
۵۶۲۲	۱۵/۷۵	۱
۷۸۶۸	۱۷/۵۱	۱/۳

بررسی تناظر فوریه- رینولدز

سرعت‌های مختلف جریان هوا و اعداد رینولدز به دست آمده متفاوت‌اند. بیشترین خطا به میزان ۱۱/۴۶ درصد مربوط به سرعت جریان هوای ۱ متر بر ثانیه در مدت زمان نیمه سرد شدن انار رباب است که قابل قبول خواهد بود. بقیه خطاهای ایجاد شده در مدت زمان نیمه و هفت- هشتم سرد شدن اندک هستند که نشان از دقت بین زمان‌های محاسبه شده با آزمایش و مقدار محاسبه شده با معادله برازش شده است. انصاری و آفاق (۱۹۸۶) و گومز و همکاران (۱۹۸۸)، با آزمایش روی هویج (سیلندری شکل) و توت‌فرنگی (کروی شکل) گزارش داده‌اند که حداکثر اختلاف بین اعداد آزمایشگاهی و محاسبه شده ± 15 درصد است. با توجه به نکات ذکر شده، پارامترهای سرد شدن (مدت زمان نیمه و هفت - هشتم سرد شدن) می‌تواند با همبستگی بین عدد فوریه و رینولدز به عنوان روشی آسان و دقیق برای اجسام کروی به کار رود که در معرض جریان هوای سرد اجباری قرار می‌گیرند.

در انار رباب با افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه، عدد فوریه محاسبه شده بر اساس معادله‌های برازش شده نمایی در جدول ۶، (Fo-Re)، کاهش می‌یابد که دلیل عمده آن افزایش عدد رینولدز و توان منفی این عدد بر اساس سرعت‌های جریان هواست. با توجه به جدول ۶، معادله توانی و سطح معنی‌داری آزمون F نشان می‌دهد که این مدل به خوبی توانسته است مقادیر مشاهده شده را تخمین بزند. میزان خطای بین اعداد به دست آمده از آزمایش و اعداد تخمین زده شده در مورد مدت زمان نیمه و مدت زمان هفت - هشتم سرد شدن، تنها به عدد فوریه محاسبه شده از معادله برازش شده بستگی ندارد، زیرا عدد فوریه محاسبه شده از معادله برازش شده، خود به ضریب نفوذ حرارتی (α) و بعد مشخصه انار (R_s) وابسته است. با توجه به اینکه در نمونه‌های مورد آزمایش، مقادیر این دو متغیر (ضریب نفوذ حرارتی و بعد مشخصه انار)، متفاوت‌اند، میزان خطا در

جدول ۶- مقایسه مدت زمان سردشدن و درصد خطای بین مقدار محاسبه شده و برازش شده بر اساس تناظر فوریه - رینولدز

سرعت جریان هوای (متر بر ثانیه)	معادله برازش شده	عدد رینولدز (بی بعد)	F_{OH} (محاسبه معادله برازش شده)	R^2	F	درصد خطای زمان سرد شدن
۰/۵	$F_{OH}=17.62(Re)^{-0.30}$	۲۸۶۰/۳۱	۱/۶۲	۷۴/۶۰	۲۰/۵۸**	۱/۱۷
۱	$F_{OH}=17.62(Re)^{-0.30}$	۵۶۲۲/۱۱	۱/۳۲	۷۴/۶۰	۲۰/۵۸**	۱۱/۴۶
۱/۳	$F_{OH}=17.62(Re)^{-0.30}$	۷۸۶۸/۲۳	۱/۱۹	۷۴/۶۰	۲۰/۵۸**	۰/۲۵

** اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، F_{OH} = عدد فوریه برای مدت زمان نیمه سردشدن، Re = عدد رینولدز $1000 < Re < 24000$

جدول ۷- مقایسه مدت زمان سردشدن و درصد خطای بین مقدار محاسبه شده و برازش شده بر اساس تناظر فوریه - رینولدز

سرعت جریان هوای (متر بر ثانیه)	معادله برازش شده	عدد رینولدز (بی بعد)	F_{OS} (محاسبه معادله برازش شده)	R^2	F	درصد خطای زمان سرد شدن
۰/۵	$F_{OS}=47.82(Re)^{-0.29}$	۲۸۶۰/۳۱	۴/۷۶	۸۵/۵۰	۴۱/۲۱**	۲/۱۸
۱	$F_{OS}=47.82(Re)^{-0.29}$	۵۶۲۲/۱۱	۳/۹۱	۸۵/۵۰	۴۱/۲۱**	۱۰/۸۳
۱/۳	$F_{OS}=47.82(Re)^{-0.29}$	۷۸۶۸/۲۳	۳/۵۵	۸۵/۵۰	۴۱/۲۱**	۳/۱۲

** اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، F_{OS} = عدد فوریه برای مدت زمان هفت-هشتم سردشدن، Re = عدد رینولدز $1000 < Re < 24000$

نتیجه گیری

مستقیم باعث افزایش ضریب سردشدن تا ۸۹/۲۹ درصد شده که کاهش در مدت زمان های سردشدن را به دنبال داشته است.

- پس از زمانی معین (در این تحقیق حدود ۵۰۰۰ ثانیه)، تاثیر سرعت جریان هوا روی سرعت سردشدن کاهش می یابد. بنابراین، به منظور کاهش مصرف انرژی در اواخر فرایند سردشدن، می توان سرعت جریان هوا را کاهش داد.

معادله های برازش شده مدت زمان های سردشدن نشان می دهد که با افزایش سرعت جریان هوا، از عدد فوریه به دست آمده در مورد مدت زمان های نیمه سردشدن و هفت - هشتم سردشدن به ترتیب ۲۶/۵۴ و ۲۵/۴۲ درصد کاسته می شود که با مدت زمان های سردشدن محاسباتی مطابقت دارد. حداکثر خطا در معادله برازش شده در مورد مدت زمان نیمه سردشدن، ۱۱/۴۶ درصد و در مورد مدت زمان هفت - هشتم سردشدن ۱۰/۸۳ درصد است که با

بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق موارد زیر قابل ذکر است:

- افزایش کارایی خنک سازی، با سریع سردشدن محصول یعنی با کاهش مدت زمان نیمه و مدت هفت - هشتم سردشدن به دست می آید. افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، مدت زمان نیمه سردشدن در مرکز، ۵۰ درصد شعاع، پوسته اسفنجی و پوسته بیرونی را به ترتیب به مقدار ۱۰/۸۶، ۲۳/۱۹، ۲۹/۵۷ و ۱۷/۶۳ درصد و مدت زمان هفت - هشتم سرد شدن را به ترتیب ۱۰/۱۳، ۲۳/۹۹، ۲۲/۸۶ و ۳۳/۳۶ درصد کاهش می دهد. این امر به نوبه خود به ضریب انتقال حرارت همرفتی بستگی دارد که این ضریب با افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، ۵۸/۴۶ درصد افزایش یافته است.

- افزایش در ضریب انتقال حرارت همرفتی به طور

توجه به منابع قابل قبول هستند. نتایج کلی آزمایش فرض یکسان بودن شرایط آزمایش، می‌توان برای اجسام با نشان می‌دهد که تناظر فوریه - رینولدز راه حلی آسان و قابل دسترس برای تعیین پارامترهای سرد شدن است و با شکل تقریباً یکسان (کروی مثل انار) مدت زمان سرد شدن را تخمین زد.

مراجع

- Ansari, F.A., and Afaq, A. 1986. Precooling of the cylindrical food products. *Int. J. Refrig.* 7, 161-163.
- AOAC. 1980. Official methods of analysis. AOAC, 13th Ed. No. 22.013, p 361.
- Brosnan, T. and Sun, D. 2001. Precooling techniques and applications for horticultural products. A review. *Int. J. Refrig.* 32, 154-170.
- Dennis, C. 1984. Effect of storage and distribution conditions on the quality of vegetables. *Acta Hort.* 163, 85-104.
- Dincer, I. and Dost, S. 1996. New correlations for heat transfer coefficients during direct cooling of products. *Int. J. Energy. Res.* 20(7): 587-594.
- Dincer, I. 1996. An exact solution on the estimating of heat transfer rates during deep-freezing of slab products. *J. Food Eng.* 30, 417-423.
- Dincer, I. 1995a. Airflow precooling of individual grapes. *J. Food Eng.* 26, 243-249.
- Dincer, I. 1995b. Simplified solution for temperature distributions of spherical and cylindrical products during rapid air cooling. *Energy Conv. Manage.* 36(12): 1175-1184.
- Dincer, I. 1993. Heat transfer coefficients in hydrocooling of spherical and cylindrical food products. *Energy.* 18(4): 335-340.
- Emond, J.P., Mercier, F., Sadfa, S.O., Bourre, M. and Gakwaya, A. 1996. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced air precooling of strawberry. *Trans. ASAE.* 39(6): 2185-2191.
- Esna-ashari, M. and Zokaee-Khosroshahi, M.R. 2009. *Post-harvest Physiology and Technology.* 2009. Bu-Ali Sina University Press. No. 298. (in Persian)
- Fadavi, A., Barzegar, M., and Azizi, M.H. 2006. Determination of fatty acids and total lipid content in oilseed of 25 pomegranates varieties grown in Iran. *J. Compo. Analy.* 19(6-7): 676-680.
- Fikiin, A.G. 1983. Investigating the factors of intensifying fruits and vegetable cooling. *Int. J. Refrig.* 6, 176-181.
- Geankoplis, C.J. 1978. *Transport Processes and Unit Operations.* Allyn and Bacon Pub.
- Golob, P., Farrell, G. and Orchard, G. E. 2002. *Postharvest Science and Technology, Principles and Practices.* Blackwell Science.
- Guemes, D. R., Pirovani, M. E. and Pentima, J. H. 1988. Heat-transfer characteristics during air precooling of strawberries. *Int. J. Refrig.* 12, 169-173.
- Guillou, R. 1960. Forced air fruit cooling. *Trans. ASAE.* 3(2): 16-18.
- Hass, E., Felsenstein, G., Shitzer, A. and Manor, G. 1976. Factors affecting resistance to airflow through packed fresh fruit. *ASHRAE Trans.* 82(2): 548-554.
- Iranian National Standards Organization. 2002. *Fruits and Vegetables, Pomegranate.* Standard No. 6409. (in Persian)

- Kader, A.A. 2002. Postharvest technology of horticultural crops. Cooperative Extension of University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, University of California, Davis, CA, Publication. No. 3311.
- Kumar, R., Kumar, A. and Murthy, U.N. 2008. Heat transfer during forced air precooling of perishable food products. *Biosys. Eng.* 99, 228-233.
- Lambrinos, G., Assimaki, H., Manolopoulou, H., Sfakiotakis, E. and Porlingis, J. 1997. Air precooling and hydrocooling of Hayward Kiwifruit. *Acta Hort.* 444, 561-566.
- Lindsay, R.T., Neale, M.A. and Messer, H. J. M. 1983. Ventilation rates for positive ventilation of vegetables in bulk bins. *J. Agric. Eng. Res.* 28(1): 33-44.
- Mohsenin, N.N. 1980. *Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials*. New York, NY: Gordon and Breach.
- Ngcobo, M .E. K., Delele, M. A., Opera. U.L. and Meyer, C. J. 2013. Performance of multi-packaging for table grapes based on airflow, cooling rates and fruit quality. *J. Food Eng.* 116, 613-621.
- Ozisik, M. N. 1985. *Heat transfer: A Basic Approach*. McGraw Hill, New York.
- Smale, N. J., Moureh, J. and Cortella, J. 2006. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications. *Int. J. Refrig.* 29, 911-930.
- Sweat, V. E. 1986. *Thermal properties of foods*. Marcel Dekker, New York.
- Thompson, J. F., Mitchel, F. G., Rumsey, T. R., Kasmire, R. F. and Crisosto, C.H. 1998. Commercial cooling of fruits, vegetables, and flowers. University of California. ANR. Pub 21567.
- Zou, Q., Linus, O. U. and Mckibbin, R. A. 2006a. CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models. *J. Food Eng.* 77(4): 1037-1047.
- Zou, Q., Linus, O. U. and Mckibbin, R. A. 2006b. CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: II. Computational solution, software development and model testing. *J. Food Eng.*, 77(4): 1048-1058.

Evaluation of Fourier – Reynolds Correlation for Estimation of Precooling Parameters of Pomegranate

M. A. Behaen^{*}, A. Mahmoudi and S. F. Ranjbar

* Corresponding Author: Ph.D student, Tabriz University, College of Agriculture, Department of Biosystem Engineering, Tabriz, Iran. E-Mail: ali_behaen@yahoo.com

Received: 17 January 2016, Accepted: 11 April 2016

Temperature management is an important subject in maintaining the quality of horticultural products after harvest. One of the methods in suitable control of temperature, is precooling, that is conducted before storing of the product which increases shelf life and storage time the fruits. On the other hand, estimation of cooling parameters (half and seven-eighths cooling times) need precise sensors and is time consuming in precooling operations. In this research, airflow velocities as an effective factor in cooling at three levels of 0.5, 1, and 1.3 m s⁻¹ was considered. Parameters including lag factor, cooling efficiency and half and seven-eighths cooling times were calculated based on recorded data of the temperature sensors. Finally, using the dimensionless numbers, Fourier and Reynolds, the estimation of regression models obtained for cooling times and compared with experimental data. With increasing airflow velocity, cooling times decreased and convective heat transfer coefficient was enhanced up to 58.46%. The overall results showed that for sphere shaped products like pomegranate, using Fo-Re correlation, cooling times are estimated with suitable precision (maximum error for half and seven-eighths cooling times 11.46 and 10.83, respectively) and without using complex equations.

Keywords: Fo-Re correlation, Half and Seven-eighths cooling times, Pomegranate, Precooling