مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۲/ شماره ٤/سال ۱۳۹۰/ص ۷۲-٦۱

تعیین گرمای ویژه و هدایت حرارتی انار (رقم آلک)

سید حبیب الله‌هاشمی فرد دهکردی[*]، مرتضی الماسی و محمد مهران‌زاده [**]

[*] نگارنده مسئول، نشانی: دزفول- دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول- گروه ماشینهای کشاورزی، کد پستی:۶۴۶۱۶۴۵۱۶۹، تلفن: ۶۲۶۰۶۰۱-۰۶۴۱، پیام نگار: hhashemifard@yahoo.com

[**] به‌ترتیب: دانشجوی دکتری مکانیک ماشینهای کشاورزی و عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول؛ عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران و دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی و عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

تاریخ دریافت:۸۹/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۱۶

چکیده

به منظور طراحی تجهیزات نگهداری وانبارداری میوهٔ انار، گرمای ویژه و هدایت گرمایی قسمت‌های مختلف (پوست، پی، دانه و هسته) انار (رقم آلک) در گسترهٔ رطوبتی ۳٤/۲ درصد تا ۸۰/۱ درصد (بر پایهٔ تر) وچهار دمای (۳،۸،۱۳، و ۱۸) درجه سلسیوس بررسی شد. روش مخلوط برای اندازه‌گیری گرمای ویژه، روش پراب برای تعیین هدایت حرارتی پوست و پی انار، و روش سیم داغ برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی دانهٔ انار به کار گرفته شد. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش دما و رطوبت، گرمای ویژه به طور خطی برای دانه، پوست، و پی انار در محدوده ۱/۱۲۷ تا ۲/۷۸۹، ۱/۵۱٦ تا ۳/٤۱۱ ، ۰/۹۳۱ تا ۳/۰٦٦ کیلوژول برکیلوگرم‌درجه سلسیوس افزایش می یابد. مقادیر هدایت گرمایی برای پوست، پی، و دانه به ترتیب در محدودهٔ ۰/۱۵۲٤ تا ۰/٤۲۱۸، ۰/۱٤۸۱ تا ۰/٤۵۱، و ۰/۱۳۱ تا ۰/٤۲۰٤ وات بر مترکلوین تعیین شد، آنالیز واریانس نشان داد که مقدار رطوبت و دما تأثیر معنی‌داری بر گرمای ویژه و هدایت گرمایی تمامی قسمت‌های انار دارند، هرچند اثر مقدار رطوبت، در مقایسه با دما، بیشتر است. برای پیش‌بینی تغییرات گرمای ویژه و هدایت حرارتی انار برحسب تابعی از دما و رطوبت، از مدل‌های رگرسیون با مقادیر بالای R^2 استفاده شد.

واژه‌های کلیدی

انار، روش سیم داغ، روش مخلوط، گرمای ویژه، هدایت حرارتی

مقدمه

انار[1] بومی ایران و یکی از محصولات مهم بخش باغبانی کشور است و هم‌اکنون به طور وسیع در کشورهای دیگر مانند اسپانیا، مصر، روسیه، فرانسه، چین ،ژاپن، و امریکا کشت می‌شود (La Rue, 1969). تولید سالانهٔ انار در کشور ۷۰۰/۰۰۰ تن است که حدود ۱۵۰/۰۰۰ تن آن صادر می‌شود. از میوه انار به صورت تازه، آب‌میوهٔ تازه، رب انار به عنوان چاشنی و از پوست آن به منظور رنگ‌آمیزی استفاده می‌شود. دانهٔ انار حاوی مقادیر قابل‌توجه اسید، قند، پلی‌فنول و سرشار از ویتامین است (Khoshnam *et al.*, 2007). نبود سیستم بسته‌بندی و انبارداری مناسب، عمر انبارداری این میوه را بسیار کوتاه می‌کند و امکان صدور به بازارهای دوردست را از دست می‌دهد، در حالی که عمده تقاضا برای انار مربوط به کشورهای اروپایی و خاور دور (ژاپن) است (Khoshnam *et al.*, 2007).

1-Punica granatum L.

© 2014,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

شکل ۱- عکس انار، واریته آلک

تعیین خواص حرارتی مواد کشاورزی مثل انار، بخصوص گرمای ویژه و هدایت حرارتی، برای طراحی واحدهایی مثل محفظه‌های نگهداری و انبارها بسیار لازم است (Razavi & Taghizadeh, 2007). یافته‌های گذشته حاکی از آن است که دما و مقدار رطوبت تأثیر زیادی روی خواص حرارتی محصولات کشاورزی می‌گذارند. گرمای ویژه مواد غذایی مختلفی در ASHRAE گزارش شده و خواص حرارتی برخی محصولات کشاورزی را محسنین (Mohsenin, 1980) تعیین کرده است. انجی و همکاران (Njie *et al.*, 1998) هدایت حرارتی موزآردی، سیب‌زمینی شیرین، و کاساوا را در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و بازه رطوبتی ۱۴ تا ۷۹ درصد و گرمای ویژه را برای دمای ۳۶ تا ۵۱ درجه سلسیوس و رطوبت ۱۰ تا ۶۸ درصد مطالعه کردند. سینگ و گوسوامی (Singh & Goswami, 2000) گرمای ویژه زیره را در دما و رطوبت‌های مختلف مطالعه کردند و گزارش کردند که با افزایش دما از ۷۰- به ۵۰ درجه سلسیوس و رطوبت از ۱/۸ درصد به ۲۰/۵ درصد، مقدار گرمای ویژه از ۱/۳۳ به ۳/۹۰ کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. آویارا و هاک (Aviara & Haque, 2001) گرمای ویژه دانهٔ شینوت را به عنوان تابعی از دما و میزان رطوبت بررسی کردند. رضوی و تقی زاده (Razavi & Taghizadeh, 2007) گرمای ویژه پسته را برای واریته‌های مختلف در دما و رطوبت‌های متفاوت مطالعه کردند و دریافتند که با افزایش دما و رطوبت، مقدار گرمای ویژه در بازه ۰/۴۱۹ تا ۲/۹۳۰ کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. این محققان مدل رگرسیونی را برای پیش‌بینی مقدار گرمای ویژه بر حسب دما و رطوبت ارائه کردند. تنساکول و لامیونگ (Tansakul & Lumyong, 2007) خواص حرارتی قارچ را مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش رطوبت و دما، مقدار گرمای ویژه و هدایت حرارتی در محدوده ۲/۲۸۴ تا ۴/۰۰۸ کیلوژول برکیلوگرم درجه سلسیوس و ۰/۲۱۲ تا ۰/۶۶۸ وات بر مترکلوین افزایش می‌یابد.

با توجه به اهمیت تولید و صادرات انار در ایران، لازم است روی خواص حرارتی آن تحقیق شود، و چون اطلاعاتی از این گونه در دست نیست تلاش شد تا خواص لازم جهت تولید دانش فنی مورد نیاز برای طراحی سیستم‌های تبادلی برودتی برای انار تعیین شود. بنابراین، هدف از این مطالعه تعیین گرمای ویژه، هدایت حرارتی، و قسمت‌های

مختلف انار واریته آلک، آنالیز تأثیر دما و رطوبت، و تعیین معادلات رگرسیون به منظور تخمین گرمای ویژه و هدایت‌حرارتی انار بر حسب دما و رطوبت است.

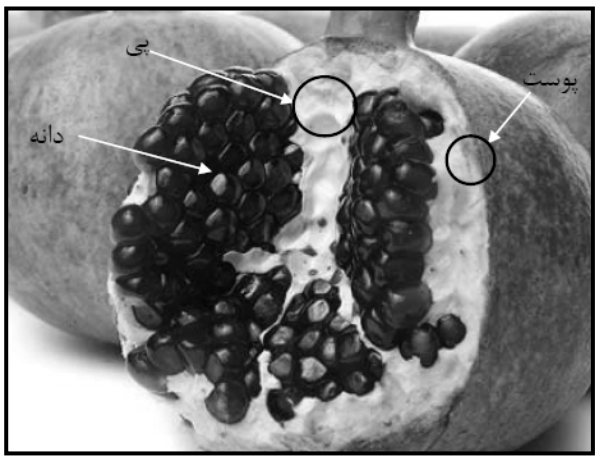
مواد و روش‌ها

آماده سازی نمونه‌ها

واریته آلک (انار شیرین) که از مهمترین واریته‌های انار در ایران است به صورت تازه از باغ‌های شهرستان ساوه برداشت و پس از شستشو با آب برای زدودن از گرد و غبار، با پارچه خشک شدند و نمونه‌ها جهت اجرای آزمایش در یخچال با دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند.

سپس انارها به صورت دستی به سه قسمت دانه، پوست[1] و پی[2] (شکل ۲) تقسیم شدند و وزن هر قسمت با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم به دست آمده و برای مدت زمان متفاوت و برای رسیدن به رطوبت مورد نظر در نایلون و در یخچال نگهداری شدند.

برای تعیین هدایت حرارتی از دو روش پراب و سیم داغ و برای تعیین گرمای ویژه کلیه قسمت‌ها از روش مخلوط[3] استفاده شد.



شکل۲- قسمتهای مختلف انار

تعیین مقدار رطوبت

رطوبت قسمت‌های مختلف انار به روش آون[4] تعیین شد. حدود ۵ تا ۸ گرم از پوست، دانه، و پی پس از وزن کردن درون آون با دمای ۲± ۱۰۲ درجه سلسیوس به مدت حدود ۱۲ ساعت قرار داده شدند تا اختلاف بین دوبار توزین متوالی ۰/۰۵ گرم شود. سپس میزان رطوبت تبخیر شده محاسبه و مقدار رطوبت برحسب پایهٔ تر بیان می‌شود. برای هر نمونه سه تکرار اجرا و میانگین مقدار رطوبت برای هر نمونه درنظر گرفته شد. رطوبت پوست، پی، ودانه به ترتیب ۵۱/۷۱، ۷۳/۰۳، و ۷۵/۹۱ درصد به دست آمد.

روش آزمایش

کلیهٔ آزمایش‌ها در چهار سطح دما (۳ تا ۱۸ درجهٔ سلسیوس) و سه مقدار رطوبت (۱۵ تا ۷۶ درصد) با سه تکراراجرا شد. این سطوح بیشتر جهت نگهداری و حمل و نقل انار استفاده می‌شود. برای تعیین رابطه بین دما و رطوبت با گرمای ویژه از بهترین مدل خطی استفاده شد.

برای برازش کردن یک منحنی بر داده‌های آزمایش RSME و X^2 بررسی شده ومدلی انتخاب شد که بیشترین X^2 و RSME را داشته باشد. معادلات رگرسیون نیز برای تخمین مقادیر گرمای ویژه و هدایت حرارتی به عنوان تابعی از دما و رطوبت تعیین شد.

1-Exocarp
2- Mesocarp
3-Mixture
4- AOAC-1984

تعیین گرمای ویژه

یکی از مناسب‌ترین روش‌های اندازه‌گیری گرمای ویژه برای مواد بیولوژیک، روش مخلوط است (La Ru, 1969) که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. در این روش، از کپسول‌های آلومینیمی با حجم کم جهت نگهداری نمونه در حین آزمایش، یک فلاسک ۲۵۰ میلی‌لیتر، و ترموکوپل نوع T به عنوان کالریمتر[1] استفاده شد. این روش بر چهار فرض استوار است: ۱- در حین انتقال کپسول از آون به کالریمتر، هیچگونه اتلاف حرارتی از کپسول حاوی مواد نداریم. ۲- کپسول و نمونه در نهایت به یک دمای یکنواخت می‌رسند. ۳- در زمان به تعادل رسیدن، هیچگونه کاهش رطوبتی در کالریمتر وجود ندارد. ۴- ظرفیت حرارتی فلاسک و کپسول دردماهای مورد مطالعه ثابت می‌ماند.

تعیین ظرفیت حرارتی فلاسک

فلاسک مورد استفاده در این آزمایش که به عنوان کالریمتر استفاده شد، یک فلاسک ۲۵۰ میلی‌لیتر بود که از شیشه، فلز و مواد عایق تشکیل شده است. به دست آوردن ظرفیت حرارتی فلاسک به روش آزمایش، آسان تر و دقیق‌تر از روش تحلیلی است. این روش عبارت است از تعیین میزان تغییر دمای آب مقطر گرم موجود در فلاسک، پس از افزودن مقدار مشخصی آب مقطرسرد به آن با فرض آدیاباتیک بودن سیستم، ظرفیت حرارتی فلاسک طبق رابطهٔ ۱ بیان می‌شود (Tansakul & Chaisawang, 2006).

$$H_f = \frac{M_{cw}.C_w(T_e - T_{cw}) - M_{hw}.C_w(T_{hw} - T_e)}{(T_{hw} - T_e)} \qquad (۱)$$

تعیین ظرفیت حرارتی کپسول

ظرفیت حرارتی کپسول آلومینیمی (۵۵ میلی‌متر ارتفاع، ۲۰ میلی‌متر قطرداخلی، و ۲ میلی‌متر ضخامت دیواره) نیز با آزمایش به این طریق به دست آمد که تغییر دمای آب داخل فلاسک را هنگامی که کپسول خالی با دمای بالاتر داخل فلاسک قرار می‌گیرد اندازه‌گیری و از رابطهٔ ۲ محاسبه می‌کنیم (Tansakul & Chaisawang, 2006).

$$H_c = \frac{(H_f + M_{cw}.C_w)(T_e - T_{cw})}{T_c - T_e} \qquad (۲)$$

تعیین گرمای ویژه[2] اجزای انار

کپسول حاوی نمونه‌ها (پوست ،پی و دانه) را داخل فلاسک حاوی آب مقطر می‌گذاریم و صبر می‌کنیم تا فرایند تبادل دما به تعادل برسد. گرمای ویژهٔ نمونه از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود (Tansakul & Chaisawang, 2006).

$$C_p = \frac{(H_f + M_{cw}.C_w)(T_e - T_{cw}) - H_c(T_m - T_e)}{M_m(T_m - T_e)} \times 4.1868 \qquad (۳)$$

تعیین هدایت حرارتی اجزای انار

در این پژوهش برای تعیین هدایت حرارتی اجزای انار از روش گذرا انتقال حرارت[3] استفاده شد. هدایت حرارتی به وسیلهٔ تغییر دمای جسم با زمان در حالت گذرا تعیین می‌شود. برای تعیین هدایت حرارتی نمونه‌های پوست و پی انار از روش پراب[1] استفاده شد (Mohsenin, 1980; Sweat & Haugh, 1974). پراب، لوله‌ای است برنجی به قطر ۲/۵ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر که در طول آن سیمی از جنس نیکل‌کروم روکش دار به آن وصل شده است؛ سیم ترموکوپل به قطر یک میلی‌متر در داخل لولهٔ برنجی، در وسط لوله و در کنار سیم داغ قرار داده شده است (شکل ۳). نمونه‌ها با رطوبت دلخواه به صورت تکه‌های کوچک تقسیم می‌شوند و پراب از وسط آن‌ها عبور داده می‌شود به گونه‌ای که هیچ فضای خالی روی پراب وجود نداشته باشد. در روش مذکور از یک سیم داغ

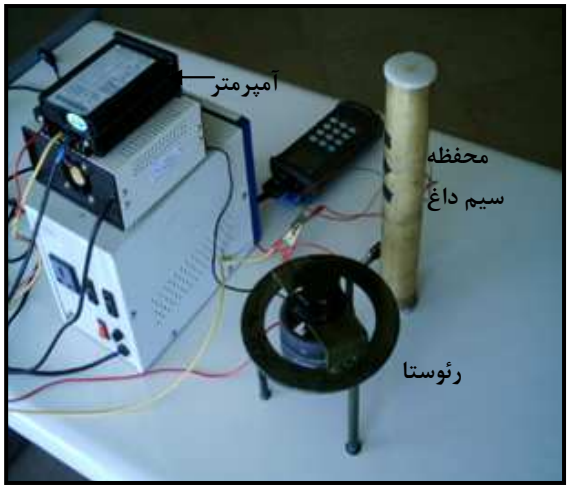
1-calorimeter
2-specific heat
3- Transient- state heat transfer

به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌شود. در این روش فرض می‌شود که محیط آزمایش همگن است و جریان حرارت در استوانه در راستای شعاع از سمت منبع حرارتی (سیم داغ) به سمت محیط باشد. مقادیر دمای ثبت شده بر حسب لگاریتم زمان ترسیم و هدایت حرارتی از رابطهٔ ۴ محاسبه شد (Choi & Okas, 1986; Hu & Mallikarjunan, 2004; Muir & Viravanichai, 1972).

$$k = \frac{(\frac{R}{l}) I^2}{4 \pi s} \qquad (۴)$$

که s شیب خط در رابطه است. رابطهٔ فوق در روش سیم داغ و روش پراب استفاده می‌شود.

شکل ۳- پراب اندازه‌گیری هدایت حرارتی پوست و پی



شکل ٤- دستگاه اندازه‌گیری هدایت حرارتی دانهٔ انار

از منبع برق جریان مستقیم جهت تولید حرارت با ولتاژ ۲۴ و جریان ۰/۶۶ آمپر به عنوان منبع توان سیم داغ استفاده شد. نمونه‌هایی که روی پراب قرار دارند گرم می‌شوند تا دمای پراب در طی ۵ تا ۷ ثانیه به ۱۰ تا ۱۵ درجه بیشتر از دمای اولیه برسد. سپس جریان قطع و دوباره وصل می‌شود. در این مراحل دمای نمونه برحسب زمان، با فاصلهٔ زمانی دو ثانیه به کمک دیتالاگر (CHY502A) ثبت می‌شود. برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت دانه‌های انار از روش سیم داغ استفاده شد (شکل ۴). دانه‌های انار باید به گونه‌ای داخل محفظه را پر کنند که تا حد ممکن اثر فاصلهٔ هوایی بین نمونه و سیم داغ به حداقل برسد. استوانهٔ حاوی نمونه‌ها درون حمام آب قرار گرفته دمای نمونه با ترموستات حمام آب، تنظیم شد. از یک عدد ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای مرکز پراب و از سیم کنستانتین برای سیم گرمکن به دلیل اینکه مقاومت کنستانتین در اثر تغییر دما تقریبا ثابت می‌ماند، استفاده شد. میزان افزایش دما در هر ثانیه با دیتالاگر ثبت و سرانجام هدایت حرارتی دانه انار با استفاده از رابطهٔ ۵ محاسبه شد (Choi & Okas,1986; Hu & Mallikarjunan, 2004; Muir & Viravanichai, 1972).

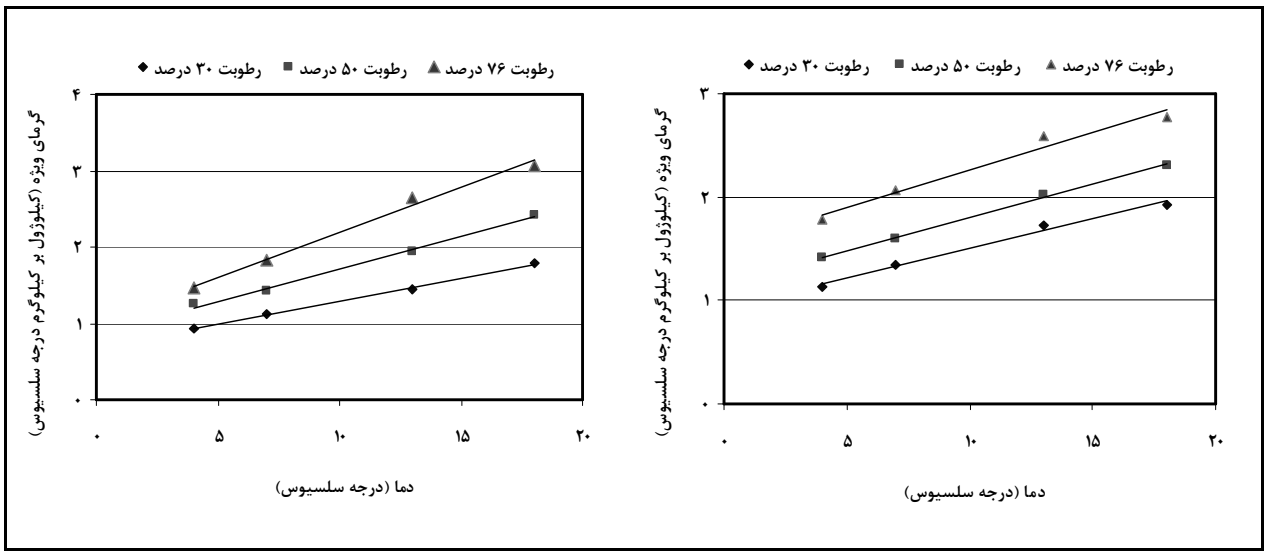
$$k = \frac{Q.\ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \qquad (۵)$$

نتایج و بحث

گرمای ویژه

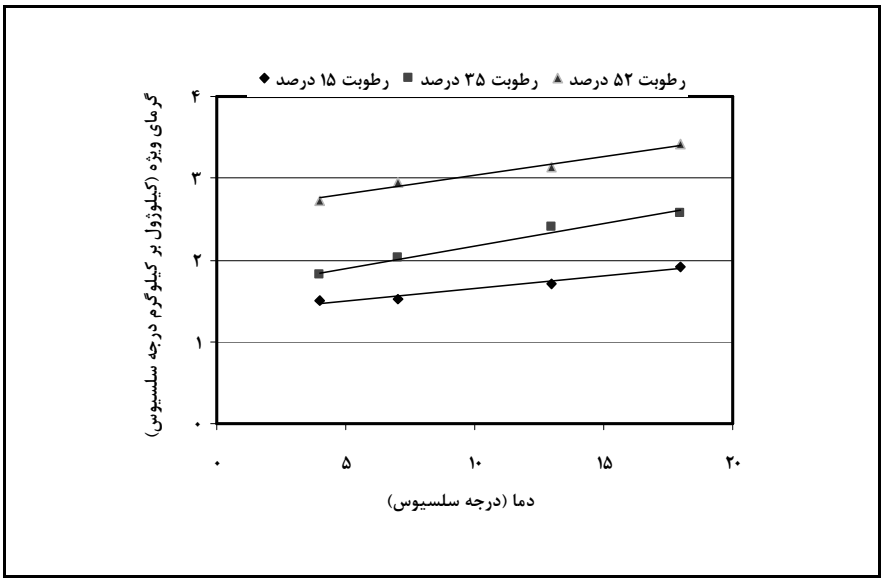
تقریبا ۵۸/۵ درصد وزنی انار آلک را دانه و ۴۱/۵

درصد بقیه را پوست و پی تشکیل می‌دهد. تغیرات گرمای ویژه دانه، پی، و پوست انار در اثر دما و رطوبت به ترتیب در شکل‌های ۵، ۶، و۷ آورده شده است.



شکل۵- گرمای ویژهٔ دانهٔ انار آلک بر حسب رطوبت و دما

شکل٦- گرمای ویژهٔ پی انار آلک بر حسب رطوبت و دما



شکل۷- گرمای ویژهٔ پوست انار آلک بر حسب رطوبت و دما

نتایج نشان می‌دهد که حداقل و حداکثر گرمای ویژه دانه، پوست، و پی به ترتیب در بازهٔ ۱/۱۲۷ تا ۲/۷۸۹، ۱/۵۱۶ تا ۳/۴۱۱، ۰/۹۳۱ تا ۳/۰۶۶ کیلوژول برکیلوگرم درجه سلسیوس قرار دارد. با افزایش رطوبت، همانند دما، مقدار گرمای ویژه افزایش می‌یابد. رطوبت و دما هر دو تأثیر معنی‌داری بر گرمای ویژهٔ قسمت‌های مختلف انار در سطح یک درصد داشتند. دلیل افزایش گرمای ویژهٔ انار در اثر افزایش رطوبت این است که آب گرمای ویژهٔ نسبتا

بالایی دارد (Sweat & Haugh, 1974). آنالیز رگرسیون نشان می‌دهد که رابطهٔ خطی بین متغیر وابسته (C_p) و متغیرهای مستقل دما (T) و مقدار رطوبت (M_c) وجود دارد. با استفاده از داده‌های آزمایش برای هر قسمت از انار، معادلهٔ ریاضی که بتواند گرمای ویژه را پیش‌بینی کند، طبق روابط ۶ تا ۸ تعیین شد.

گرمای ویژه دانه

$$C_p = 0.2513 + 0.05789\ T + 1.97976\ M_c \quad (R^2 = 0.983)\ \ 3^\circ C \langle T \langle 18^\circ C\ ,\ 30\% \langle M_c \langle 76\% \qquad (۶)$$

گرمای ویژه پی

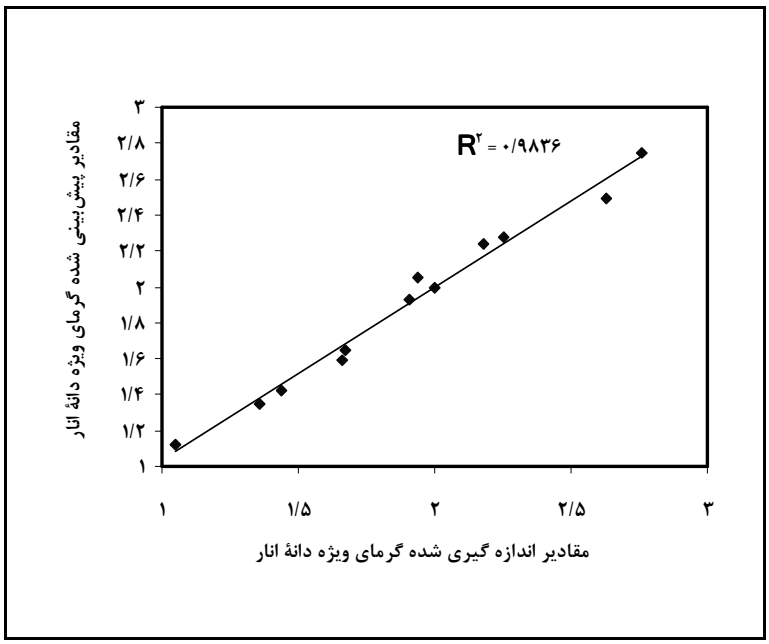
$$C_p = -0.321 + 0.09508T + 2.297M_c \quad (R^2 = 0.9661)\ \ 3^\circ C \langle T \langle 18^\circ C\ ,\ 30\% \langle M_c \langle 76\% \qquad (۷)$$

گرمای ویژه پوست

$$C_p = 0.6879 + 0.0422\,T + 0.0351\,M_c \quad (R^2 = 0.944)\ 3^\circ C \langle T \langle 18^\circ C\ ,15\% \langle M_c \langle 52\% \qquad (۸)$$

برای ارزیابی تأثیر متغیرهای مستقل بر گرمای ویژه، آنالیز واریانس روی داده‌ها انجام شد. مقایسهٔ بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شدهٔ گرمای ویژه (شکل۸) نشان می‌دهد که ماکزیمم تفاوت آن‌ها ۰/۰۶۵± کیلوژول برکیلوگرم درجه سلسیوس که برای گرمای ویژه مطلوب است. مقایسهٔ مقادیر F-value رطوبت و دما روی گرمای ویژه نشان داد که تأثیر رطوبت بر گرمای ویژه بیشتر از تأثیر دما بود.

افزایش گرمای ویژه انار در اثر افزایش دما و مقدار رطوبت، با نتایج قبلی محققان مطابقت دارد. گرمای ویژهٔ گندم بهاره در دمای ۳۳/۵- درجه سلسیوس تا ۲۱/۸ درجه سلسیوس و رطوبت ۱تا ۲۳ درصد، به صورت خطی در محدودهٔ ۱/۰۵۴ تا ۲/۵۲۱ کیلوژول برکیلوگرم‌درجه سلسیوس تغییر می‌کند (Rahman, 1995).

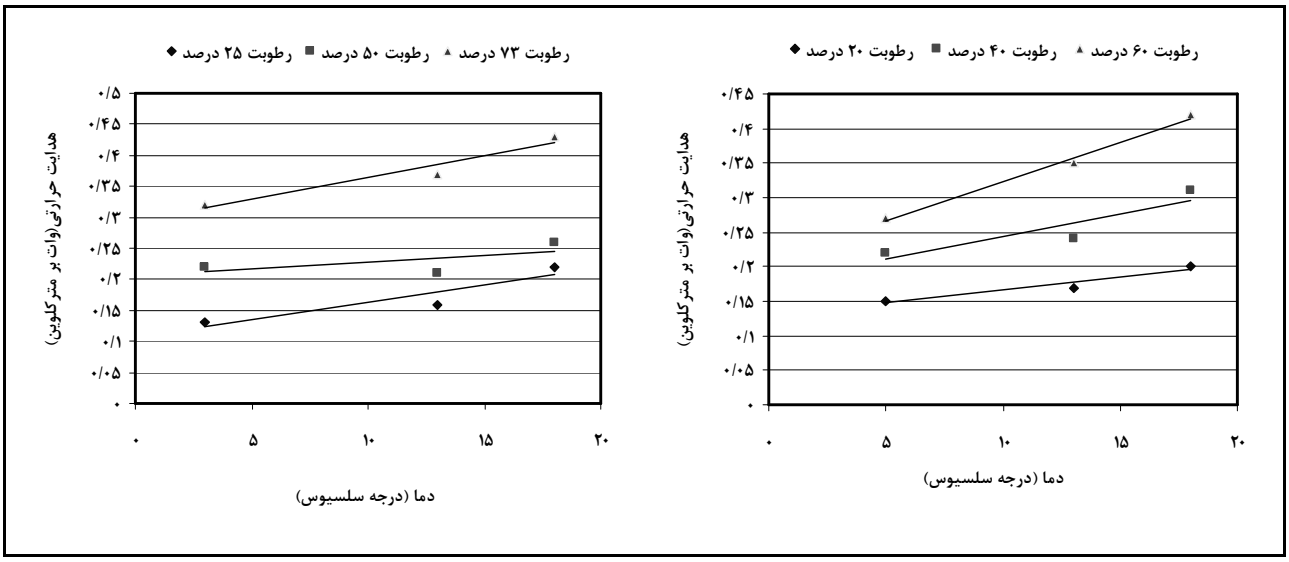


شکل۸ - مقادیر پیش‌بینی‌شده گرمای ویژه در برابر مقادیر اندازه‌گیری‌شده

بررسی‌های ناراین و همکاران (Narain *et al.*, 1978) نشان می‌دهد که گرمای ویژهٔ سبوس برنج با افزایش دما و رطوبت، به صورت خطی در محدوده ۱/۷۰۲ تا ۲/۱۸۹ کیلوژول برکیلوگرم‌درجه سلسیوس تغییر می‌کند. مطالعات شیرواستاوا و داتا (Shirvastava & Datta, 1999) نشان می‌دهد که با افزایش دما و رطوبت به ترتیب درمحدوده ۴۰ تا۷۰ درجه سلسیوس و ۱۰/۲۴ تا ۸۹/۶۸ درصد، گرمای ویژهٔ قارچ به صورت خطی در محدوده ۱/۷۱۵۸ تا ۳/۹۴۹۸ کیلوژول برکیلوگرم‌درجه سلسیوس تغییر می‌کند. گرمای ویژهٔ پسته را رضوی و تقی‌زاده در چهار رقم پسته ایرانی تعیین کردند (Razavi & Taghizadeh, 2007). و نشان دادند که تابعی از دما و رطوبت است.

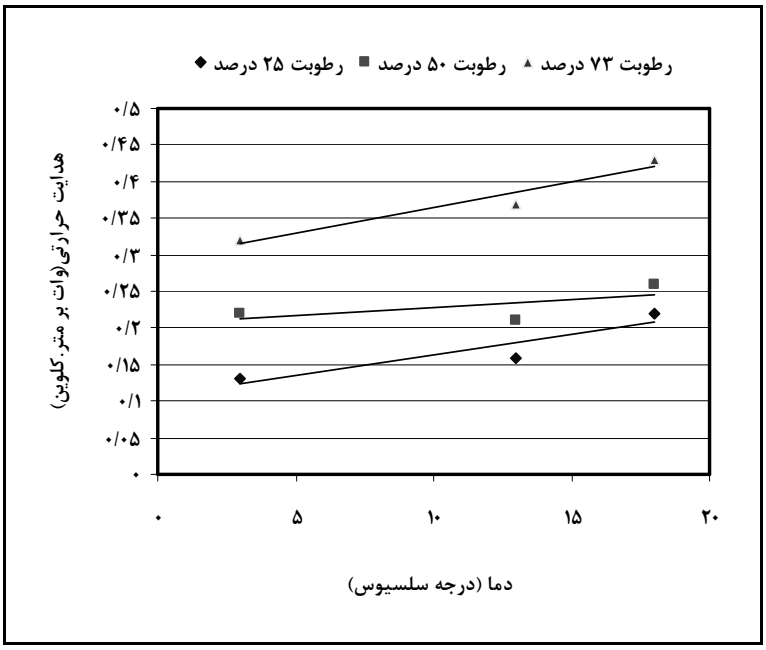
هدایت حرارتی

آزمایش‌ها نشان داد که هدایت حرارتی پی (شکل۹)، پوست (شکل۱۰)، و دانه (شکل۱۱) برای انار آلک به ترتیب بین ۰/۱۵ تا ۰/۴۲، ۰/۱۵ تا ۰/۴۵، ۰/۱۳ تا ۰/۴۳ وات بر مترکلوین تغییر می‌کند. در یک دمای ثابت، با افزایش رطوبت، مقدار هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. رطوبت و دما هر دو تأثیر معنی‌داری در سطح ۱درصد بر هدایت حرارتی داشتند. در میان کلیهٔ عناصر تشکیل دهندهٔ مواد غذایی مانند آب، پروتئین، کربوهیدرات، و چربی، هدایت حرارتی آب از همه بیشتر است (Rahman, 1995)، بنابراین با کاهش مقدار رطوبت، هدایت حرارتی نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه اثر رطوبت بر هدایت حرارتی بیشتر از اثر دماست.



شکل۹- هدایت حرارتی پی انار آلک برحسب رطوبت و دما

شکل۱۰- هدایت حرارتی پوست انار آلک برحسب رطوبت و دما



شکل۱۱- نتایج هدایت حرارتی دانه انار آلک برحسب رطوبت و دما

آنالیز رگرسیون نشان داد که رابطهٔ غیرخطی درجه دوم بین متغیر وابسته (k) و متغیرهای مستقل دما (T) و مقدار رطوبت (Mc) وجود دارد. با استفاده از مقادیر به دست آمدهٔ هدایت حرارتی انار بر حسب دما و رطوبت در سطوح انتخاب شده، روابط تجربی زیر به دست آمد. نتایج حاصل از رابطهٔ با مقادیر تجربی و رابطهٔ رگرسیون به دست آمده در این تحقیق مقایسه شد (شکل ۱۲).

رابطهٔ رگرسیون هدایت حرارتی دانهٔ انار

$$k = 0.1416 + 2.39\times10^{-4}T^2 - 0.130(M_c) + 0.521(M_c)^2 \quad (R^2 = 0.985) \quad 5^\circ C \langle T \langle 17^\circ C\ ,\ 25\% \langle M_c \langle 73\% \qquad (۹)$$

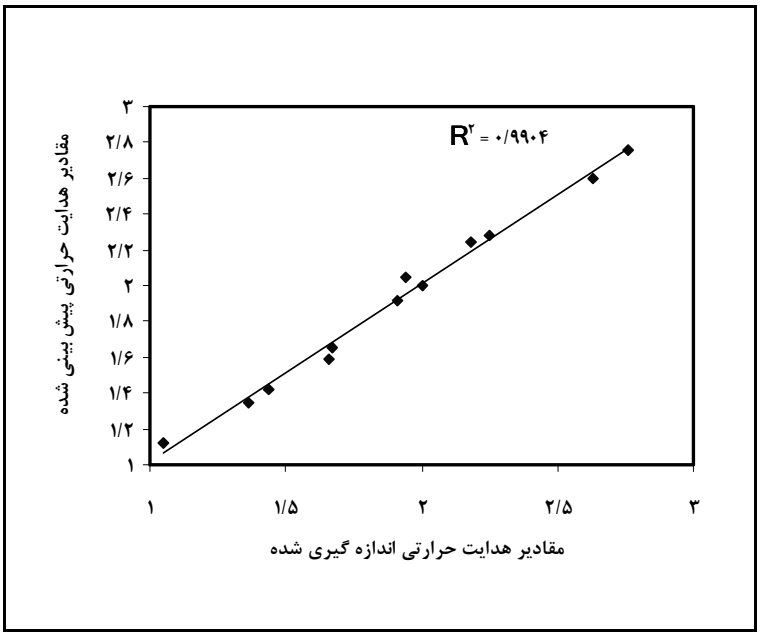
رابطهٔ رگرسیون هدایت حرارتی پی انار

$$k = 0.0772 + 3.4\times10^{-4}T^2 + 0.0.238(M_c) + 0.226(M_c)^2 \quad (R^2 = 0.991) \quad 5^\circ C \langle T \langle 17^\circ C\ ,\ 20\% \langle M_c \langle 60\% \qquad (۱۰)$$

رابطهٔ رگرسیون هدایت حرارتی پوست انار

$$k = 0.1276 + 3.14\times10^{-4}T^2 - 0.211(M_c) + 0.902(M_c)^2 \quad (R^2 = 0.995) \quad 5^\circ C \langle T \langle 17^\circ C\ ,\ 15\% \langle M_c \langle 52\% \qquad (۱۱)$$

آنالیز واریانس به وضوح نشان می‌دهد که مقدار رطوبت، در مقایسه با دما، اثر بیشتری بر هدایت حرارتی دارد. ضریب بالای مقدار رطوبت در روابط رگرسیون نیز این موضوع را تأیید می‌کند.



شکل۱۲- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شدهٔ هدایت حرارتی

مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شدهٔ هدایت حرارتی (شکل۱۲) نشان می‌دهد که ماکزیمم تفاوت آنها ۰/۰۳± وات بر مترکلوین است که نمایانگر دقت خوب روابط پیش‌بینی مقادیر هدایت حرارتی انار هستند. شکل‌های ۱۰،۹، و۱۱ نشان می‌دهند که هدایت حرارتی دانه، پی، و پوست انار با افزایش دما و مقدار رطوبت، افزایش می‌یابند که با نتایج قبلی محققان مطابقت دارد. تحقیقات چاندرا و موویر (Chandra & Muir, 1971) نشان می‌دهد که هدایت حرارتی گندم بهاره با افزایش رطوبت (۴/۵ تا۲۵ درصد) و دما (۶- تا۲۰ درجه سلسیوس)، در محدوده (۰/۱۳۸۲ تا ۰/۱۶۷۱ وات بر مترکلوین) تغییر می‌کند. مطالعات شیرواستاوا و داتا (Shirvastava & Datta, 1999) نشان می‌دهد که با افزایش دما و رطوبت به ترتیب در محدودهٔ ۴۰ تا۷۰ درجه سلسیوس و ۱۰/۲۴ تا ۸۹/۶۸ درصد، مقدار هدایت حرارتی از ۰/۲۰۸۴ تا ۰/۵۳۰۹ وات بر مترکلوین افزایش می‌یابد. هدایت حرارتی زیره را سینگ و گوسامی (Singh & Goswami, 2000) بررسی کردند و رابطهٔ چند جمله‌ای درجه دومی برای تخمین مقادیر هدایت حرارتی آن، به عنوان تابعی از دما و رطوبت، ارائه دادند. تانساکول (Tansakul & Lumyong, 2007) نیز در مورد قارچ خوراکی به نتایج مشابهی دست یافتند.

نتیجه‌گیری

گرمای ویژه و هدایت حرارتی انار به طور معنی‌دار تحت تأثیر دما و مقدار رطوبت قرار دارد. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین گرمای ویژه و هدایت حرارتی با دما و رطوبت انار وجود دارد. اثر رطوبت بر گرمای ویژه و هدایت حرارتی بسیار بیشتر از دماست. معادلات ارائه شده برای پیش‌بینی ویژگی‌های حرارتی انار با دقت بالایی برای گرمای ویژه (R^2=۰/۹۸۳۶) و هدایت حرارتی (R^2=۰/۹۹۰۴) استفاده شد.

قدردانی

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول به جهت حمایت مالی برای اجرای این تحقیق قدردانی می‌شود.

فهرست اصطلاحات و پارامترها:

BD	چگالی ظاهری (کیلوگرم بر مترمکعب)	k	هدایت حرارتی (وات بر متر.کلوین)
c	کپسول تست	l	طول سیم داغ (متر)
cw	آب مقطر سرد	M_c	مقدار رطوبت (درصد)
C_w	گرمای ویژه آب	m	نمونه انار
C_p	گرمای ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم.درجه سلسیوس)	Q	توان گرمکن (وات بر متر)
e	شرایط تعادل	R	مقاومت سیم داغ (اهم)
f	فلاسک	S	دمای پراب (کلوین)
H	ظرفیت گرمایی	T	دما (درجه سلسیوس)
hw	آب مقطر گرم	t	زمان (ثانیه)
I	جریان الکتریکی (آمپر)		

مراجع

Aviara, N.A. and Haque, M.A. 2001. Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel. J. Food. Eng. 47, 109-113.

Chandra, S. and Muir, W.E. 1971. Thermal Conductivity of Spring Wheat at Low Temperatures. Trans. ASAE. 14(4), 644-648.

Choi, Y. and Okos, M.R. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: Le Maguer, M., Jelen, P. (Eds.), In: Food Engineering and Process Applications. 1, 93-101.

Hu, X. and Mallikarjunan, P. 2004. Thermal and dielectric properties of shucked oysters. Lebensm Wiss. u.-Technology. (in Press)

Khoshnam, F., Tabatabaeefar, A., Ghasemi, A. and Borghei, M. 2007. Mass modeling of pomegranate (Punica granatum L.) fruit with some physical characteristics. J. Sci. Hortic. 2726, 1-3.

La Rue, J.H. 1969. Growing pomegranate in California. Univ. Calif. Agric. Expt. Stalft.

Mohsenin, N. N. 1980. Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials. New York: Gordon and Breach.

Muir, W.E. and Viravanichai, E. 1972. Specific Heat of Wheat. J. Agric. Eng. Res. 17, 338-342.

Narain, M., Bose, S.S.C., Jha, M. and Dwivedi, V.K. 1978. Physicothermal Properties of Rice Bran. J. Food. Sci. Technol. 15(1): 18-19.

Njie, D.N., Rumsey, T.R. and Singh, R.P. 1998. Thermal Properties of Cassava, Yam and Plantain. J. Food. Eng. 37, 63-76.

Rahman, S. 1995. Thermal Conductivity of Foods. Food Properties Handbook. CRC Press. Boca Raton.

Razavi, S.M. A. and Taghizadeh. M. 2007. The specific heat of pistachio nuts as affected by moisture content, temperature, and variety, J. Food. Eng. 79, 158-167.

Shrivastava, M. and Datta, A.K. 1999. Determination of Specific Heat and Thermal Conductivity of Mushrooms (Pleurotus Forida). J. Food. Eng. 39, 255-260.

Singh, K.K. and Goswami, T.K. 2000. Thermal properties of cumin seed. J. Food. Eng. 45, 175-181.

Sweat, V.E. and Haugh, C.G. 1974. Thermal conductivity probe for small food samples. Trans. ASAE. 17(1): 56-58.

Tansakul, A. and Chaisawang, P. 2006. Thermophysical properties of coconut milk. J. Food. Eng. 73, 276-280.

Tansakul, A. and Lumyong, R. 2007. Thermal properties of straw mushroom. J. Food. Eng. 87, 91-98.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.12/No.4/2012/P:61-72*

Specific Heat and Thermal Conductivity of Pomegranates (Alak variety)

S. H. Hashemi Fard*, M. Almassi and M. Mehranzadeh

* Corresponding Author: Ph.D. Student of Agricultural Machinery Mechanical Engineering, Department of Department of Agricultural Technical Engineering, Azad Dezful University, Dezful, Iran. E-Mail: hhashemifard@yahoo.com
Received: 15 February 2011, Accepted: 8 October 2011

To design equipment and facilities to dry, preserve and process pomegranates, it is necessary to know their specific heat and thermal conductivity. The objectives of this study were to determine the specific heat and thermal conductivity of pomegranates and develop mathematical estimation models for them. The effects of moisture content (15-75% w.b.) and temperature (5-20°C) on the thermal properties of pomegranates (Alak variety) were studied. Specific heat was measured using the mixtures method. The thermal conductivity was measured using a line heat source probe for pomegranate exocarps and mesocarps and the bare-wire transient method for the seeds. The results showed that an increase in moisture content and temperature produced a linear increase in the specific heat from 1.127 to 2.789 kJ/kg°C for seeds, 0.931 to 3.066 kJ/kg°C for mesocarps, and 1.516 to 3.411 kJ/kg°C for exocarps. Thermal conductivity increased from 0.1524 to 0.4218 W/m°C for seeds, 0.148 to 0.451 W/m°C for mesocarps and 0.131 to 0.4204 W/m°C for exocarps as moisture content and temperature increased. However, the effect of moisture content was greater than the effect of temperature on specific heat and thermal conductivity. The empirical equations for these thermal properties were subsequently expressed as a function of moisture content and temperature.

Keywords: Pomegranate, Specific heat, Thermal conductivity, Thermal conductivity