مجله مهندسي بيوسيستم ايران (۴۲) ۲, ۱۳۹۰ (۱۸۱-۱۷۵)

تعيين گرماي ويژه و هدايت حرارتي اجزاي انار (رقم آلک)

محمدحسين كيان‌مهر[۱]*، سيدرضا حسن بيگي[۲] و سيد حبيب‌اله هاشمي فرد دهكردي[۳]
[۱، ۲] دانشياران [۳] دانشجوي كارشناسي ارشد، پرديس ابوريحان، دانشگاه تهران
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۹/۹/۴ - تاريخ تصويب: ۱۳۹۰/۸/۳)

چكيده

به منظور طراحي تجهيزات نگهداري و انبارداري انار، گرماي ويژه و هدايت حرارتي قسمت‌هاي مختلف (رقم آلک) اندازه‌گيري شد. گرماي ويژه پوست، پي و دانه انار در سه سطح رطوبتي بر پايه تر (۳۰، ۵۰ و ۷۶% براي دانه و پي، ۱۵، ۳۵ و ۵۲% براي پوست) و در چهار سطح دماي (۳، ۸، ۱۳و ۱۸ درجه سلسيوس)، همچنين هدايت گرمايي اجزاي مذكور در سه سطح رطوبتي بر پايه تر (۲۵، ۵۰ و ۷۳% براي دانه، ۲۰، ۴۰ و ۶۰% براي پي، ۱۵، ۳۵ و ۵۲% براي پوست) و در سه دماي (۵، ۱۳ و ۱۸ درجه سلسيوس) بررسي شد. روش مخلوط براي اندازه‌گيري گرماي ويژه، روش پراب به منظور تعيين هدايت حرارتي پوست و پي انار و روش سيم داغ براي اندازه‌گيري هدايت حرارتي دانه انار استفاده شد. با افزايش دما و رطوبت، گرماي ويژه به طور خطي به ترتيب براي دانه، پوست و پي انار در محدوده ۱/۱۲۷ تا ۲/۷۸۹، ۱/۵۱۶ تا ۳/۴۱۱، ۰/۹۳۱ تا ۳/۰۶۶ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس افزايش يافت. مقادير هدايت گرمايي براي پوست، پي و دانه به ترتيب در محدوده ۰/۱۵۲ تا ۰/۴۲۲، ۰/۱۴۸ تا ۰/۴۱۲ و ۰/۱۳۱ تا ۰/۳۷۲ وات بر متر درجه سلسيوس تعيين شد. نتايج نشان داد كه محتواي رطوبتي و دما تأثير معني‌داري بر روي گرماي ويژه و هدايت گرمايي تمامي قسمت‌هاي انار داشتند. براي پيش‌بيني تغييرات گرماي ويژه و هدايت حرارتي انار بر حسب توابعي دما و رطوبت از مدل‌هاي رگرسيوني با مقادير بالاي ضريب تعيين (R^2) استفاده شد.

واژه‌هاي كليدي: انار، سيم داغ، رگرسيون، گرماي ويژه، هدايت حرارتي.

مقدمه

ميوه انار[۱] بومي ايران بوده و يكي از محصولات مهم بخش باغباني كشور است و هم اكنون به طور وسيع در كشورهاي ايران، اسپانيا، مصر، روسيه، فرانسه، چين، ژاپن و امريكا كشت مي‌شود (Patil & Karade, 1996). توليد سالانه انار در كشور ۷۰۰ هزار تن است كه در حدود ۱۵۰ هزار تن آن صادر مي‌شود. از ميوه انار به صورت تازه، آبميوه تازه، رب انار به عنوان چاشني و از پوست آن به منظور رنگ‌آميزي استفاده مي‌شود. دانه انار حاوي مقادير قابل ملاحظه اسيد، قند، پلي‌فنول بوده و سرشار از ويتامين است (La Rue, 1969). عدم سامانه بسته‌بندي و انبارداري مناسب، باعث شده است كه عمر انبارداري انار بسيار كوتاه شده و امكان صدور به بازارهاي دوردست با مشكل مواجه باشد. در حالي كه عمده تقاضا براي انار مربوط به كشورهاي اروپايي و خاور دور (ژاپن) است.

تعيين خواص حرارتي مواد كشاورزي به‌خصوص گرماي ويژه و هدايت حرارتي براي طراحي محفظه‌هاي نگهداري و انبارها لازم است (Shrivastava & Datta, 1999). يافته‌هاي گذشته حاكي از آن است كه دما و محتواي رطوبتي تأثير زيادي بر خواص حرارتي محصولات كشاورزي مي‌گذارند (Chandra & Muir, 1971; Muir & Viravanichai, 1972; Mohsenin, 1980; Rahman, 1995; Njie et al., 1998; Aviara. & Haque, 2001; Razavi & Taghizadeh, 2007). هدايت حرارتي بارهنگ، سيب‌زميني شيرين و كاساوا را در دماي ۳۰ درجه سلسيوس و بازه رطوبتي ۱۴ تا ۷۹% و گرماي ويژه در محدوده دماي ۳۶ تا ۵۱ درجه سلسيوس و محتواي رطوبت ۱۰ تا ۶۸% مطالعه شد (Njie et al., 1998). در دانه ارزن با افزايش دما از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسيوس و رطوبت از ۱/۸% به ۲۰/۵%، مقدار گرماي ويژه از ۱/۳۳ به ۳/۹۰ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس افزايش يافت (Subramanian & Viswanathan, 2003). گرماي ويژه دانه شي‌نات[۲] به عنوان تابعي از دما و محتواي رطوبتي تعيين شد (Aviara, & Haque, 2001). در تحقيقي گرماي ويژه ارقام مختلف پسته در دما و رطوبت‌هاي متفاوت تعيين شد. در اين تحقيق مشخص شد كه با افزايش دما و رطوبت، مقدار گرماي ويژه در بازه ۰/۴۱۹ تا ۲/۹۳۱ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس افزايش مي‌يابد، در ضمن

* نويسنده مسئول: Kianmehr@ut.ac.ir

1. *Punica granatum* L.

2. Sheanut

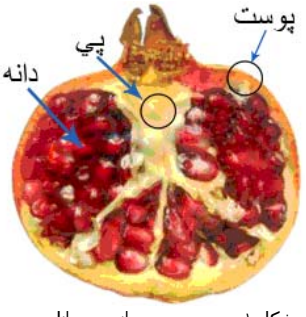
مدل‌هاي رگرسيوني نيز براي پيش‌بيني مقدار گرماي ويژه ارقام مختلف پسته بر حسب دما و رطوبت ارايه گرديد (Razavi & Taghizadeh, 2007). بررسي‌ها نشان داد كه با افزايش رطوبت و دما، مقادير گرماي ويژه و هدايت حرارتي قارچ به ترتيب در محدوده ۲/۲۸٤ تا ٤/۰۰۸ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس و ۰/۲۱۲ تا ۰/٦٦۸ وات برمتر درجه سلسيوس افزايش مي‌يابند (Shrivastava & Datta, 1999).

با توجه به اهميت توليد و صادرات انار در ايران نياز است بر روي خواص حرارتي آن بررسي‌هاي لازم صورت گيرد. به علت عدم وجود هرگونه اطلاعات در اين موضوع، اقدام به تعيين خواص لازم جهت توليد دانش فني مورد نياز براي طراحي سامانه‌هاي تبادلي برودتي براي انار شد. بنابراين هدف از اين مطالعه تعيين گرماي ويژه و هدايت حرارتي قسمت‌هاي مختلف انار براي رقم آلک، تحليل تأثير دما و رطوبت و همچنين تعيين معادلات رگرسيوني به منظور تخمين گرماي ويژه و هدايت حرارتي انار بر حسب دما و رطوبت است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازي نمونه‌ها (پوست، پي و دانه انار)

رقم آلک (انار شيرين) كه جزء مهمترين رقم‌هاي انار در ايران است به صورت تازه از باغ‌هاي شهرستان ساوه برداشت شده، پس از شستشو با آب براي پاک شدن از گرد و غبار توسط پارچه رطوبت‌گيري شدند. انارها جهت انجام آزمايش‌ها درون يخچال با دماي 5°C نگهداري شد. سپس انارها به صورت دستي به سه قسمت دانه، پوست[1] و پي[2] تقسيم شده (شكل ۱) و جرم هر قسمت توسط ترازوي ديجيتال (Kern, Germany) با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گيري شده، درون نايلون در باز قرار داده و در محيطي با دماي ۱۸ تا ۲۵ درجه سلسيوس و رطوبت نسبي بين ۳۸ تا ۷۰ درصد به مدت ۲٤ تا ۷٤ ساعت براي رسيدن به رطوبت مورد نياز آزمايش‌ها نگهداري شدند.



شكل ۱- پوست، پي و دانه ميوه انار.

1. Exocarp
2. Mesocarp

تعيين محتواي رطوبتي

محتواي رطوبت پوست، پي و دانه انار رقم آلک توسط آون تعيين شد. حدود ۵ تا ۸ گرم از پوست، دانه و پي درون آون با دماي ۲±۱۰۲ درجه سلسيوس قرار داده شد. ملاک مدت زمان باقي ماندن نمونه‌ها در آون اندازه‌گيري تغيير جرم نمونه‌ها تا رسيدن به تغييرات جرم كمتر از ۰/۰۲ گرم بود. سپس ميزان رطوبت تبخير شده محاسبه شده و محتواي رطوبتي بر حسب پايه تر به دست آمد. براي هر نمونه سه تكرار انجام گرفت و ميانگين محتواي رطوبتي براي هر نمونه در نظر گرفته شد. رطوبت پوست، پي و دانه به ترتيب ۵۱/۷۱، ۷۳/۰۳ ، ۷۵/۹۱% بر پايه تر به دست آمد.

روش آزمايش

آزمايش‌هاي مربوط به گرماي ويژه پوست، پي و دانه انار در چهار سطح دماي (۳، ۸، ۱۳ و ۱۸ درجه سلسيوس) و در سه سطح رطوبتي بر پايه تر (۳۰، ۵۰ و ۷۶% براي دانه و پي، ۱۵، ۳۵ و ۵۲% براي پوست) و همچنين آزمايش‌هاي هدايت گرمايي اجزاي مذكور در سه سطح رطوبتي بر پايه تر (۲۵، ۵۰ و ۷۳% براي دانه، ۲۰، ۴۰ و ۶۰% براي پي، ۱۵، ۳۵ و ۵۲% براي پوست) و در سه دماي (۵، ۱۳ و ۱۸ درجه سلسيوس) تعيين شد. كليه آزمايش‌ها در سه تكرار انجام شد. اين سطوح بيشتر جهت نگهداري و حمل و نقل انار استفاده مي‌شود. براي تعيين رابطه بين گرماي ويژه با دما و رطوبت از رگرسيون چند متغيره استفاده شد. براي برازش كردن منحني بر داده‌هاي آزمايش خطاي استاندارد رگرسيون[3] (RSE) و ضريب تعيين[4] (R^2) بررسي شده و مدلي انتخاب شد كه بيشترين R^2 و كمترين RSE را داشته باشد.

تعيين گرماي ويژه

يكي از مناسب‌ترين روش‌هاي اندازه‌گيري گرماي ويژه براي مواد بيولوژيک، روش مخلوط است كه در اين تحقيق نيز استفاده شده است (Mohsenin, 1980; Tansakul & Chaisawang, 2006; Tansakul & Lumyong, 2007). در اين روش از كپسول‌هاي آلومينيومي با حجم كم جهت قرار دادن نمونه‌ها در حين انجام آزمايش‌ها، يک فلاسک به عنوان كالريمتر[5] و ترموكوپل نوع T استفاده شد. اين روش بر چهار فرض استوار است (Shrivasta & Datta, 1999; Razavi & Taghizadeh; 2007):

3.Regression standard error
4. Coefficient of determination
5. Calorimeter

۱- در حین انتقال کپسول از آون به کالریمتر، هیچگونه اتلاف حرارتي از کپسول حاوي مواد وجود نخواهد داشت،
۲- کپسول و نمونه در نهایت به یک دماي یکنواخت مي‌رسند،
۳- در زمان به تعال رسیدن هیچگونه کاهش رطوبتي در کالریمتر وجود ندارد و
۴- ظرفیت حرارتي فلاسک و کپسول در دماهاي مورد مطالعه ثابت مي‌ماند.

تعیین ظرفیت حرارتي فلاسک

فلاسک مورد استفاده در این آزمایش که به عنوان کالریمتر استفاده شد، فلاسکي با حجم ۲۵۰ سانتي‌متر مکعب بود که از شیشه، با محفظه داراي خلاء، مواد عایق و پوسته فلزي تشکیل شده است. به دست آوردن ظرفیت حرارتي فلاسک به روش آزمایش، آسان‌تر و دقیق‌تر از روش تحلیلي مي‌باشد. در این روش میزان تغییر دماي آب مقطر گرم موجود در فلاسک پس از افزودن مقدار مشخصي آب مقطر سرد به آن، با فرض آدیاباتیک بودن سامانه تعیین مي‌شود. ظرفیت حرارتي فلاسک طبق رابطه (۱) بیان مي‌شود (Shrivastava & Datta, 1999; Razavi & Taghizadeh, 2007):

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

تعیین ظرفیت حرارتي کپسول

ظرفیت حرارتي کپسول آلومینیمي (۵۵ میلي‌متر ارتفاع، ۲۰ میلي‌متر قطر داخلي و ۲ میلي‌متر ضخامت دیواره) نیز با آزمایش به این طریق بدست آمد که تغییر دماي آب داخل فلاسک هنگامي که کپسول خالي با دماي بالاتر داخل فلاسک قرار مي‌گیرد را اندازه‌گیري کرده و از طریق رابطه (۲) محاسبه مي‌شود (Shrivasta & Datta, 1999; Razavi & Taghizadeh, 2007):

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

تعیین گرماي ویژه[1] اجزاي انار

کپسول حاوي نمونه‌ها (پوست، پي و دانه) هر کدام را به طور مجزا داخل فلاسک حاوي آب مقطر گذاشته و صبر کرده (بر حسب دماي آزمایش، زمان انتظار در محدوده ۵ تا ۴۵ دقیقه متغیر بود) تا با ثابت شدن دما فرآیند تبادل دما به تعادل برسد. گرماي‌ویژه نمونه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Shrivasta & Datta, 1999; Razavi & Taghizadeh, 2007):

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

تعیین هدایت حرارتي اجزاي انار

در این پژوهش براي تعیین هدایت حرارتي اجزاي انار از روش انتقال حرارت گذرا[2] استفاده شد. هدایت حرارتي به وسیله تغییر دماي جسم با زمان در حالت گذرا تعیین مي‌شود. براي تعیین هدایت حرارتي نمونه‌هاي پوست و پي انار از روش پراب[3] استفاده شد (Mohsenin, 1980; Tabil, 1999). پراب، لوله برنجي به قطر ۲/۵ میلي‌متر و طول ۵۰ میلي‌متر بود که در طول آن سیمي از جنس نیکل کروم روکش‌دار به آن وصل شده و سیم ترموکوپل T به قطر یک میلي‌متر در داخل لوله برنجي، در وسط لوله و در کنار سیم داغ قرار داده شده است (شکل ۲). نمونه‌هاي پوست و پي با رطوبت دلخواه به صورت تکه‌هاي کوچکي با ابعاد حدود ۲۰ میلي‌متر تقسیم شده و پراب از وسط آن‌ها عبور داده مي‌شود به گونه‌اي که هیچ فضاي خالي بر روي پراب وجود نداشته باشد. در روش مذکور از یک سیم داغ به عنوان منبع حرارتي استفاده مي‌شود. در این روش فرض شده است که محیط آزمایش همگن بوده و جریان حرارت در استوانه در راستاي شعاع از سمت منبع حرارتي (سیم داغ) به سمت محیط باشد. حرارت جسم در فاصله r از منبع حرارت در مختصات استوانه‌اي به وسیله معادله دیفرانسیل (۴) بیان مي‌شود که حل معادله (۵) مي‌باشد (Tansakul & Lumyong, 2007):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right] \quad (۴)$$

$$T - T_0 = (\frac{Q}{4.\pi k}).E_i(-\frac{r^2}{4.\alpha.t}) \quad (۵)$$

با بسط انتگرال تابع نمایي ($E_i(\frac{-r^2}{4.\alpha t}) = E_i(X_i)$) و حذف توان‌هاي مرتبه بالا، معادله (۵) به صورت رابطه (۶) ساده مي‌شود:

$$T - T_0 = -(\frac{Q}{4.\pi k}).[\gamma + \ln(\frac{r^2}{4\alpha t})] \quad (۶)$$

$$\Delta T = (\frac{Q}{4.\pi k}).[\ln t - \ln(\frac{r^2}{4\alpha e^{0.5772}})] \quad (۷)$$

مقادیر تغییر دماي ثبت شده (محور y) بر حسب لگاریتم زمان (محور x) ترسیم شده و هدایت حرارتي نهایتاً از رابطه (۸) محاسبه شد.

1. Specific heat

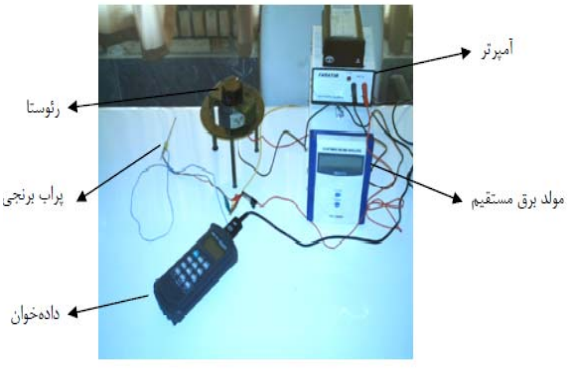
2. Transient-state heat transfer
3. Line heat source probe method

$$k = \frac{Q}{4\pi s} \quad (۸)$$

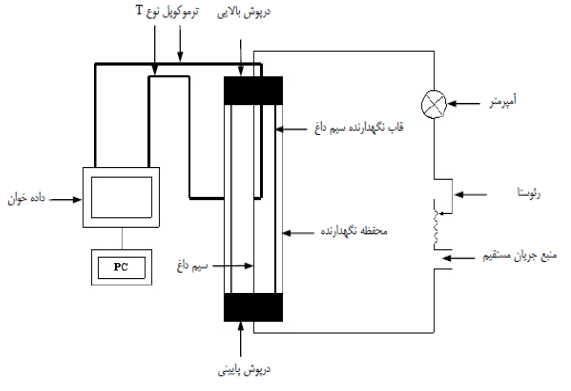
مقدار Q از حاصل ضرب توان دوم شدت جريان ورودي به سيم داغ در مقاومت الكتريكي آن به ازاي طول سيم به دست مي‌آيد، بنابراين مقدار هدايت حرارتي از رابطه (۹) محاسبه مي‌گردد:

$$k = \frac{(\frac{R}{l}) I^2}{4 \pi s} \quad (۹)$$

شيب خط (s) از روي نمودار ΔT بر حسب نمودار لگاريتم زمان به دست مي‌آيد (Mohsenin, 1980; Weat, 1995; Tansakul & Chaisawang, 2006).



شكل ۲- اجزاي سامانه مورد استفاده جهت اندازه‌گيري هدايت حرارتي پوست و پي (به روش پراب).



شكل ۳- طرحواره اجزاي سامانه مورد استفاده جهت اندازه‌گيري هدايت حرارتي دانه انار (به روش سيم داغ).

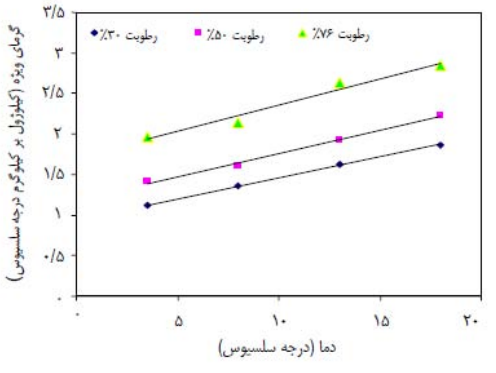
از منبع برق جريان مستقيم جهت توليد حرارت با ولتاژ ۲۴ ولت و جريان ۰/۶۶ آمپر به عنوان منبع توان پراب استفاده شد. نمونه‌هايي كه بر روي پراب قرار داشتند گرم شده تا دماي پراب طي ۵ تا ۷ ثانيه به دماي ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسيوس بيشتر از دماي اوليه برسد. در طي اين مراحل دماي نمونه بر حسب زمان، با فاصله زماني يک ثانيه به كمک داده‌خوان (CHY502A) ساخت كشور تايوان ثبت گرديد.

به منظور اندازه‌گيري ضريب انتقال حرارت دانه‌هاي انار از روش سيم داغ استفاده شد (شكل ۳). دانه‌هاي انار درون استوانه‌اي كه سيم داغ در آن نصب شده است به آرامي ريخته شد. در هنگام پر كردن استوانه به بدنه آن ضرباتي با دست به آرامي زده شد تا حد ممكن اثر فاصله هوايي بين نمونه و سيم داغ به حداقل برسد. استوانه حاوي نمونه‌ها درون حمام آب قرار گرفته و دماي نمونه توسط تنظيم ترموستات حمام آب، تنظيم مي‌شد. از يک ترموكوپل T براي اندازه‌گيري دماي مركز پراب و از سيم كنستانتين براي سيم گرمكن به دليل اين كه مقاومت كنستانتين در اثر تغيير دما تقريباً ثابت مي‌ماند، استفاده شد. ميزان افزايش دما هر يک ثانيه توسط داده‌خوان ثبت گرديد. داده‌هاي ثبت شده توسط داده‌خوان به رايانه منتقل گرديد و توسط نرم افزارهاي Excel و SPSS ترسيمات و محاسبات آماري انجام شد.

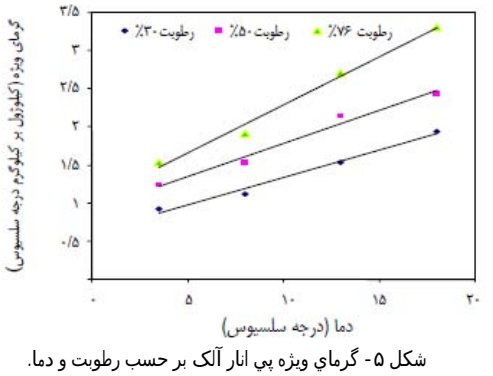
نتايج و بحث

گرماي ويژه

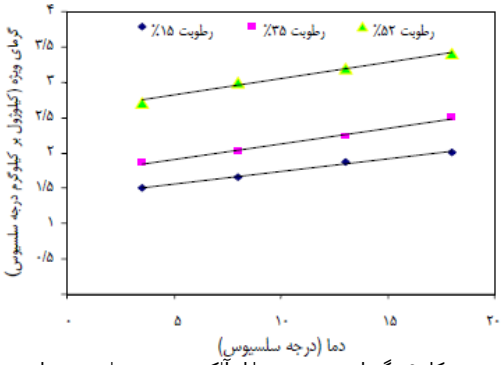
۵۸/۵ درصد وزني انار آلک را دانه و ۴۱/۵ بقيه را پوست و پي تشكيل داده‌اند. تغييرات گرماي ويژه دانه، پي و پوست انار با دما و رطوبت به ترتيب در شكل‌هاي۴، ۵ و۶ آورده شده است.



شكل ۴- گرماي ويژه دانه انار آلک بر حسب رطوبت و دما.



شكل ۵- گرماي ويژه پي انار آلک بر حسب رطوبت و دما.



شکل ۶ - گرماي ویژه پوست انار آلک بر حسب رطوبت و دما.

مقادیر حداقل و حداکثر گرماي ویژه دانه، پوست و پي به ترتیب در بازه ۱/۱۲۷ تا ۲/۷۸۹، ۱/۵۱۶ تا ۳/۴۱۱، ۰/۹۳۱ تا ۳/۲۶ کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس قرار داشت. با افزایش رطوبت، همانند دما، مقدار گرماي ویژه افزایش یافت. رطوبت و دما هر دو تاثیر معني‌داري بر گرماي ویژه قسمت‌هاي مختلف انار در سطح یک درصد داشتند. دلیل افزایش گرماي ویژه انار در اثر افزایش رطوبت به دلیل این است که آب گرماي ویژه نسبتاً بالایي دارد. (Tansakul & Chaisawang, 2006). آنالیز رگرسیون نشان داد که یک رابطه خطي معني‌دار بین متغیر وابسته (C_p) و متغیرهاي مستقل دما (T) و محتواي رطوبت (Mc) وجود داشت. با استفاده از داده‌هاي آزمایش براي هر قسمت از انار معادله ریاضي که بتواند گرماي ویژه را پیش بیني کند، تعیین شد (روابط ۱۰ تا ۱۲).

(۱۰) گرماي ویژه دانه

$$C_p = 0.2886 + 0.0566(T) + 0.0195(Mc)$$

$$(R^2 = 0.983, RSE = 0.0743) \quad 3^\circ C \langle T \langle 18^\circ C, \; 30\% \langle Mc \langle 76\%$$

(۱۱) گرماي ویژه پي

$$C_p = -0.214 + 0.091(T) + 0.0211(Mc)$$

$$(R^2 = 0.948, RSE = 0.1738) \quad 3^\circ C \langle T \langle 18^\circ C, \; 30\% \langle Mc \langle 76\%$$

(۱۲) گرماي ویژه پوست

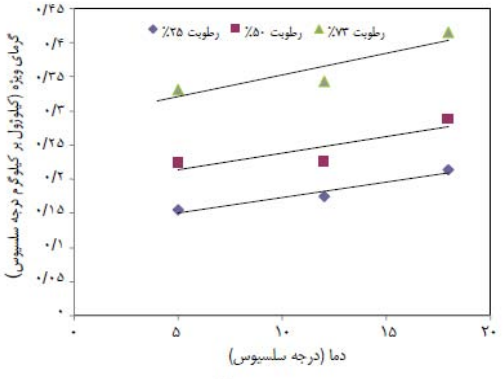
$$C_p = 0.7045 + 0.0413(T) + 0.0347(Mc)$$

$$(R^2 = 0.939, RSE = 0.1690) \quad 3^\circ C \langle T \langle 18^\circ C, \; 15\% \langle Mc \langle 52\%$$

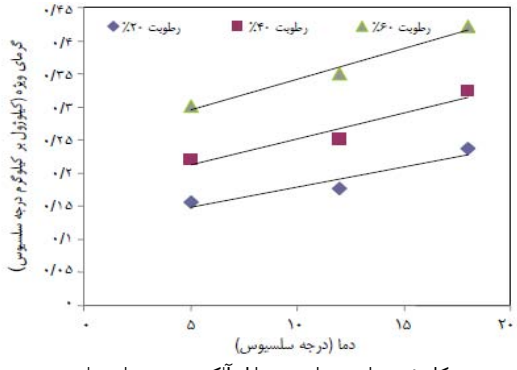
مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیري شده و پیش‌بیني شده مقادیر گرماي ویژه نشان داد که حداکثر تفاوت آنها در محدوده ۰/۰۹± کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس مي‌باشد که بیانگر دقت مطلوب معادلات برازش شده مي‌باشد. افزایش گرماي ویژه انار در اثر افزایش دما و محتواي رطوبتي، با نتایج قبلي محققان مطابقت دارد. گرماي ویژه گندم بهاره در دماي۳۳/۵- تا ۲۱/۸ درجه سلسیوس و رطوبت ۱ تا ۲۳%، به صورت خطي در محدوده ۱/۰۵۴ تا ۲/۵۲ کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس تغییر کرد (Muir & Viravanichai, 1972). بررسي محققان نشان داد که گرماي ویژه سبوس برنج با افزایش دما و رطوبت، به صورت خطي در بازه ۱/۷۰۲ تا ۲/۱۸۹ کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس تغییر کرد (Narain et al., 1978). با افزایش دما و رطوبت در بازه ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس و ۱۰/۲۴ تا ۸۹/۶۸%، گرماي ویژه قارچ‌ها به صورت خطي در محدوده ۱/۷۲ تا ۳/۹۵ کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس تغییر کرد (Shrivastava & Datta, 1999). گرماي ویژه پسته به عنوان تابعي از دما و رطوبت توسط Razavi & Taghizadeh (2007) تعیین شد. آن‌ها نشان دادند که گرماي ویژه چهار رقم پسته ایراني تابعي از دما و رطوبت است.

هدایت حرارتي

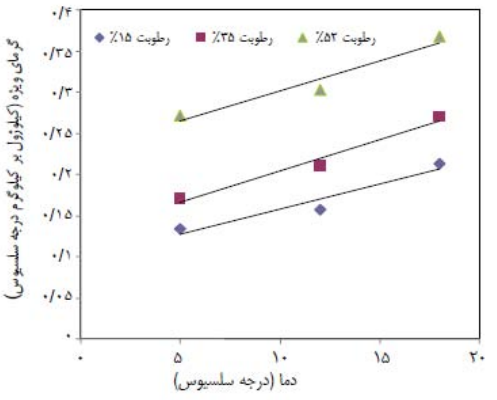
هدایت حرارتي دانه (شکل ۷)، پي (شکل ۸) و پوست (شکل ۹) براي انار آلک به ترتیب بین ۰/۱۵ تا ۰/۴۲، ۰/۱۵ تا ۰/۴۱ و ۰/۱۳ تا ۰/۳۷ وات بر متر درجه سلسیوس تغییر کرد. واضح است که در یک دماي ثابت، با افزایش رطوبت، مقدار هدایت حرارتي افزایش مي‌یابد. با آنالیز ضرایب رابطه هدایت حرارتي با رطوبت و دما مشخص شد که رطوبت و دما هر دو تأثیر معني‌داري در سطح ۱% بر روي هدایت حرارتي داشت. در میان کلیه عناصر تشکیل دهنده موادغذایي مانند آب، پروتئین، کربوهیدرات و چربي، هدایت حرارتي آب از همه بیشتر است (Mohsenin, 1980)، بنابراین با کاهش محتواي رطوبتي، هدایت حرارتي کاهش مي‌یابد.



شکل ۷- هدایت حرارتي دانه انار آلک در سه سطح رطوبت.



شکل ۸- هدایت حرارتي پي انار آلک در سه سطح رطوبت.



شکل ۹- هدايت حرارتي پوست انار آلک در سه سطح رطوبت و سه دما.

آناليز رگرسيون نشان داد که رابطه خطي بين متغير وابسته هدايت حرارتي (K) و متغيرهاي مستقل دما (T) و محتواي رطوبت (Mc) وجود داشت. با استفاده از مقادير به دست آمده هدايت حرارتي انار بر حسب دما و رطوبت در سطوح انتخاب شده، معالات تجربي زير به دست آمد.

(۱۳) هدايت حرارتي دانه

$$K = 0.0149 + 0.0053(T) + 0.0037(Mc)$$
$$(R^2 = 0.947, RSE = 0.0227) \quad 5^\circ C \langle T \langle 18^\circ C\ ,\ 25\% \langle Mc \langle 73\%$$

(۱۴) هدايت حرارتي پي

$$K = 0.0015 + 0.0076(T) + 0.0041(Mc)$$
$$(R^2 = 0.971, RSE = 0.0148) \quad 5^\circ C \langle T \langle 18^\circ C\ ,\ 20\% \langle Mc \langle 60\%$$

(۱۵) هدايت حرارتي پوست

$$K = 0.0172 + 0.0071(T) + 0.0039(Mc)$$
$$(R^2 = 0.949, RSE = 0.0200) \quad 5^\circ C \langle T \langle 18^\circ C\ ,\ 15\% \langle Mc \langle 52\%$$

مقايسه بين مقادير اندازه‌گيري شده و پيش‌بيني شده مقادير هدايت حرارتي نشان داد که حداکثر تفاوت آن‌ها ۰/۰۵± وات بر متر درجه سلسيوس مي‌باشد که نمايانگر دقت خوب معادلات برازش شده مي‌باشد. شکل‌هاي (۷)، (۸) و (۹) نشان مي‌دهند که هدايت حرارتي دانه، پي و پوست انار با افزايش دما و محتواي رطوبت، افزايش مي‌يابند که با نتايج قبلي محققان مطابقت دارد. تحقيقات نشان داد که هدايت حرارتي گندم بهاره با افزايش رطوبت (٤/٥ تا ٢٥%) و دما (٦- تا ٢٠ درجه سلسيوس)، در محدوده ۰/۱۳۸۲ تا ۰/۱٦۷ وات بر متر درجه سلسيوس تغيير مي‌کند (Chandra & Muir, 1971). مطالعات نشان داد که هدايت گرمايي قارچ با افزايش دما در بازه ٤٠ تا ٧٠ درجه سلسيوس و رطوبت در بازه ۱۰/۲٤ تا ۷۹/٦۸%، از ۰/۲۰۸٤ تا ۰/۵۳۰۹ وات بر متر سلسيوس افزايش مي‌يابد (Shrivastava & Datta, 1999). بررسي‌ها نشان داد که هدايت حرارتي زيره تابعي درجه دو از دما و رطوبت مي‌باشد (Singh & Goswami, 2000). محققان به نتايج مشابهي در مورد کاه قارچ خوراکي رسيدند (Tansakul & Lumyong, 2007).

نتيجه‌گيري

گرماي ويژه و هدايت حرارتي انار به طور معني‌داري تحت تأثير دما و محتواي رطوبتي قرار داشت. نتايج به وضوح نشان داد که رابطه خطي بين گرماي ويژه و هدايت حرارتي انار با دما و رطوبت وجود دارد. با توجه به اين‌که حداکثر تفاوت بين مقادير اندازه‌گيري شده و پيش‌بيني شده گرماي ويژه و هدايت حرارتي به ترتيب ۰/۰۹± کيلوژول بر کيلوگرم درجه سلسيوس و ۰/۰۵± وات بر متر درجه سلسيوس مي‌باشد، لذا مدل‌هاي پيشنهادي قابليت تخمين مطلوب مقادير گرماي ويژه و هدايت حرارتي اجزاي انار رقم آلک را دارا مي‌باشند.

سپاسگزاري

بدين وسيله از معاونت محترم پژوهشي دانشگاه تهران و پرديس ابوريحان به خاطر فراهم آوردن امکان اين پژوهش تشکر و قدرداني مي‌گردد.

نمادها

نماد	تعريف	واحد
C_p	گرماي ويژه جسم	kJ/kg°C
C_w	گرماي ويژه آب	cal/g°C
C_e	عدد ثابت $e^{-0/5772}$	cal/g°C
H_c	ظرفيت حرارتي کپسول	cal/°C
H_f	ظرفيت حرارتي فلاسک	cal/°C
I	شدت جريان	A
k	هدايت حرارتي جسم	W/m°C
l	طول سيم داغ	m
Mc	محتواي رطوبت	%
M_{cw}	جرم آب سرد	g
M_{hw}	جرم آب گرم	g
M_m	جرم نمونه	g
Q	حرارت ايجاد شده توسط سيم داغ	W
R	مقاومت الکتريکي سيم داغ	Ω
s	شيب خط	
t	زمان	s
T	دما	°C
T_c	دماي کپسول	°C
T_{cw}	دماي آب سرد درون فلاسک	°C
T_{hw}	دماي آب گرم درون فلاسک	°C
T_e	دماي تعادل	°C
T_m	دماي نمونه	°C
$\Delta T=T-T_0$	تغييرات دما (دماي اوليه و دماي در حال تغيير جسم در فاصله r از سيم داغ)	°C
α	ضريب پخش حرارتي جسم	mm^2/s
γ	ثابت اولر که برابر است با عدد ثابت ۰/۵۷۷۲	

REFERENCES

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

Shrivastava, M. & Datta, A.K. (1999). Determination of specific heat & thermal conductivity of mushrooms (Pleurotus Forida). *J. Food Eng*., 39, 255-260.

Singh, K. & Goswami, T.K. (2000). Thermal properties of cumin seed. *J. Food Eng.*, 45, 181-187.

Subramanian, S. & Viswanathan, R. (2003). Thermal properties of minor millet grains & flours. *Biosystems Engineering*, 84, 289-296.

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

Tabil, L.G. (1999). *Specific Heat of Agricultural & Food Materials.* Research report, Department of Agricultural & Bioresource Engineering. University of Saskatchewan, Canada.

Tansakul, A. & Chaisawang, P. (2006). Thermophysical properties of coconut milk. *J. Food Eng.*, 37, 276- 280.

Tansakul, A. & Lumyong, R. (2007). Thermal properties of straw mushroom. *J. Food Eng*., 87, 91-98.

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

Chandra, S. & Muir, W.E. (1971). Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. *Transactions of the ASAE,* 14, 644- 648.

Chandrasekar, V. & Viswanathan, R. (1999). Physical & thermal properties of coffee. *J. Agric. Eng. Res.*, 73, 227-234.

La Rue, J. H. (1969). *Growing Pomegranate in California*. Univ. Calif. Agric. Ext.

Mohsenin, N. N. (1980). *Thermal properties of Foods & Agricultural Materials*. New York: Gordon & Breach. USA.

Muir, W.E. & Viravanichai, E. (1972). Specific heat of wheat. *J. Agric. Eng. Res*, 17, 338-342.

Narain, M.S; Bose, M.J. & Dwivedi, V.K. (1978). Physicothermal properties of rice bran. *J. Food Sci.* & *Tec.*, 15, 18–19.

Njie, D.N. & Rumsey, T.R. & Singh, R.P. (1998). Thermal properties of Cassava, Yam & Plantain. *J. Food Eng.*, 37, 63-76.

Patil, A.V. & Karade, A.R. (1996). In: Bose, T.K., Mitra, S.K. (Eds), Fruits: *Tropical & Subtropical Calcutta.* Naya Prakash.

Rahman, S. (1995). *Food Properties Handbook (Thermal Conductivity of Foods)*. CRC Press, Boca Raton, USA. 275-335.