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

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

محمدحسين کيان‌مهر[1]*، سيدرضا حسن بيگي[2] و سيد حبيب‌اله هاشمي فرد دهکردي[3]
[1، 2] دانشياران [3] دانشجوي کارشناسي ارشد، پرديس ابوريحان، دانشگاه تهران
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۹/۹/۴ - تاريخ تصويب: ۱۳۹۰/۸/۳)

چکيده

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 مذکور 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 کيلوژول بر کيلوگرم 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 که 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 کليدي: انار، سيم داغ، رگرسيون، گرماي ويژه، هدايت حرارتي.

مقدمه

ميوه انار[1] بومي ايران بوده و يکي از محصولات مهم بخش باغباني کشور است و هم اکنون به طور وسيع در کشورهاي ايران، اسپانيا، مصر، روسيه، فرانسه، چين، ژاپن و امريکا کشت مي‌شود (Patil & Karade, 1996). توليد سالانه انار در کشور ۷۰۰ هزار تن است که 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 که عمر انبارداري انار بسيار کوتاه شده و امکان صدور به بازارهاي دوردست با مشکل مواجه باشد. در حالي که عمده تقاضا براي انار مربوط به کشورهاي اروپايي و خاور دور (ژاپن) است.

تعيين خواص حرارتي مواد کشاورزي به‌خصوص گرماي ويژه و هدايت حرارتي براي طراحي محفظه‌هاي نگهداري و انبارها لازم است (Shrivastava & Datta, 1999). يافته‌هاي گذشته حاکي از آن است که دما و محتواي رطوبتي تأثير زيادي بر خواص حرارتي محصولات کشاورزي 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 کاساوا را در دماي ۳۰ درجه سلسيوس و بازه رطوبتي ١٤ تا ٧٩% و گرماي ويژه در محدوده دماي ٣٦ تا ٥١ درجه سلسيوس و محتواي رطوبت ١٠ تا ٦٨% 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 کيلوژول بر کيلوگرم درجه سلسيوس افزايش يافت (Subramanian & Viswanathan, 2003). گرماي ويژه دانه شي‌نات[2] 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 که با افزايش دما و رطوبت، مقدار گرماي ويژه در بازه ٠/٤١٩ تا ٢/٩٣١ کيلوژول بر کيلوگرم درجه سلسيوس افزايش مي‌يابد، در ضمن

* نويسنده مسئول: Kianmehr@ut.ac.ir

1. *Punica granatum* L.

2. Sheanut

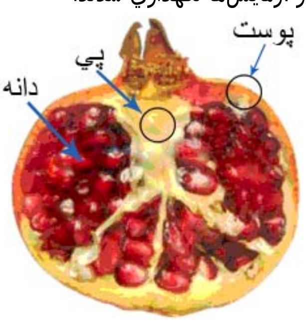
مدل‌هاي رگرسيوني نيز براي پيش‌بيني مقدار گرماي ويژه ارقام مختلف پسته بر حسب دما و رطوبت ارايه گرديد (Razavi & Taghizadeh, 2007). بررسي‌ها نشان داد که با افزايش رطوبت و دما، مقادير گرماي ويژه و هدايت حرارتي قارچ به ترتيب در محدوده ۲/۲۸٤ تا ٤/۰۰۸ کيلوژول بر کيلوگرم درجه سلسيوس و ۰/۲۱۲ تا ۰/٦٦۸ وات برمتر 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) که 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 ۵°C نگهداري شد. سپس انارها به صورت دستي به سه قسمت دانه، پوست[1] و پي[2] تقسيم شده (شکل 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 ٢٤ تا ٧٤ ساعت براي رسيدن به رطوبت مورد نياز آزمايش‌ها نگهداري شدند.



شکل 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 کمتر 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 تکرار 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 مذکور 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. کليه آزمايش‌ها در سه تکرار 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 کردن منحني بر داده‌هاي آزمايش خطاي استاندارد رگرسيون[3] (RSE) و ضريب تعيين[4] (R^2) بررسي شده و مدلي انتخاب شد که بيشترين R^2 و کمترين RSE را داشته باشد.

تعيين گرماي ويژه

يکي از مناسب‌ترين روش‌هاي اندازه‌گيري گرماي ويژه براي مواد بيولوژيک، روش مخلوط است که در اين تحقيق نيز استفاده شده است (Mohsenin, 1980; Tansakul & Chaisawang, 2006; Tansakul & Lumyong, 2007). در اين روش از کپسول‌هاي آلومينيومي با حجم کم جهت قرار دادن نمونه‌ها در حين انجام آزمايش‌ها، يک فلاسک به عنوان کالريمتر[5] و ترموکوپل 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 حين انتقال کپسول از آون به کالريمتر، هيچگونه اتلاف حرارتي از کپسول حاوي مواد وجود نخواهد داشت،

۲- کپسول و نمونه در نهايت به يک دماي يکنواخت مي‌رسند،

۳- در زمان به تعال رسيدن هيچگونه کاهش رطوبتي در کالريمتر وجود ندارد و

۴- ظرفيت حرارتي فلاسک و کپسول در دماهاي مورد مطالعه ثابت مي‌ماند.

تعيين ظرفيت حرارتي فلاسک

فلاسک مورد استفاده در اين آزمايش که به عنوان کالريمتر استفاده شد، فلاسکي با حجم ۲۵۰ سانتي‌متر مکعب بود که از شيشه، با محفظه داراي خلاء، مواد عايق و پوسته فلزي تشکيل شده است. به دست آوردن ظرفيت حرارتي فلاسک به روش آزمايش، آسان‌تر و دقيق‌تر از روش تحليلي مي‌باشد. در اين روش ميزان تغيير دماي آب مقطر گرم موجود در فلاسک پس از افزودن مقدار مشخصي آب مقطر سرد به آن، با فرض آدياباتيک بودن سامانه تعيين مي‌شود. ظرفيت حرارتي فلاسک طبق رابطه (۱) بيان مي‌شود (Shrivastava & Datta, 1999; Razavi & Taghizadeh, 2007):

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

تعيين ظرفيت حرارتي کپسول

ظرفيت حرارتي کپسول آلومينيمي (۵۵ ميلي‌متر ارتفاع، ۲۰ ميلي‌متر قطر داخلي و ۲ ميلي‌متر ضخامت ديواره) نيز با آزمايش به اين طريق بدست آمد که تغيير دماي آب داخل فلاسک هنگامي که کپسول خالي با دماي بالاتر داخل فلاسک قرار مي‌گيرد را اندازه‌گيري کرده و از طريق رابطه (۲) محاسبه مي‌شود (Shrivasta & Datta, 1999; Razavi & Taghizadeh, 2007):

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

تعيين گرماي ويژه[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 آزمايش، زمان انتظار در محدوده ۵ تا ۴۵ دقيقه متغير بود) تا با ثابت شدن دما فرآيند تبادل دما به تعادل برسد. گرماي‌ويژه نمونه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Shrivasta & Datta, 1999; Razavi & Taghizadeh, 2007):

1. Specific heat

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

تعيين هدايت حرارتي اجزاي انار

در اين پژوهش براي تعيين هدايت حرارتي اجزاي انار از روش انتقال حرارت گذرا[2] استفاده شد. هدايت حرارتي به وسيله تغيير دماي جسم با زمان در حالت گذرا تعيين مي‌شود. براي تعيين هدايت حرارتي نمونه‌هاي پوست و پي انار از روش پراب[3] استفاده شد (Mohsenin, 1980; Tabil, 1999). پراب، لوله برنجي به قطر ۲/۵ ميلي‌متر و طول ۵۰ ميلي‌متر بود که در طول آن سيمي از جنس نيکل کروم روکش‌دار به آن وصل شده و سيم ترموکوپل T به قطر يک ميلي‌متر در داخل لوله برنجي، در وسط لوله و در کنار سيم داغ قرار داده شده است (شکل ۲). نمونه‌هاي پوست و پي با رطوبت دلخواه به صورت تکه‌هاي کوچکي با ابعاد حدود ۲۰ ميلي‌متر تقسيم شده و پراب از وسط آن‌ها عبور داده مي‌شود به گونه‌اي که هيچ فضاي خالي بر روي پراب وجود نداشته باشد. در روش مذکور از يک سيم داغ به عنوان منبع حرارتي استفاده مي‌شود. در اين روش فرض شده است که محيط آزمايش همگن بوده و جريان حرارت در استوانه در راستاي شعاع از سمت منبع حرارتي (سيم داغ) به سمت محيط باشد. حرارت جسم در فاصله r از منبع حرارت در مختصات استوانه‌اي به وسيله معادله ديفرانسيل (۴) بيان مي‌شود که حل معادله (۵) مي‌باشد (Tansakul & Lumyong, 2007):

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

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

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

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

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

مقادير تغيير دماي ثبت شده (محور y) بر حسب لگاريتم زمان (محور x) ترسيم شده و هدايت حرارتي نهايتاً از رابطه (۸) محاسبه شد.

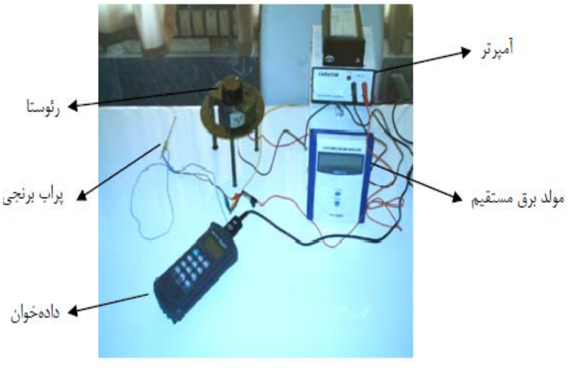
2. Transient-state heat transfer
3. Line heat source probe method

$$k=\frac{Q}{4.\pi s} \qquad (۸)$$

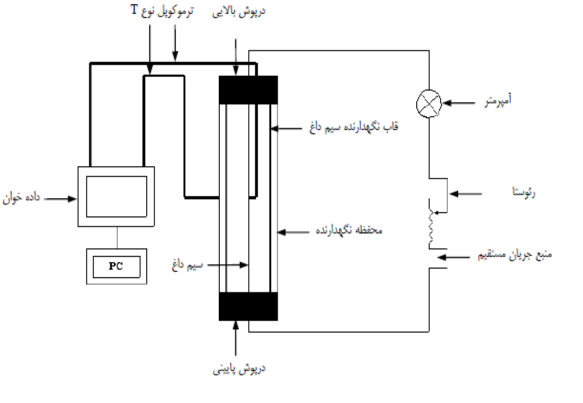
مقدار Q از حاصل ضرب توان دوم شدت جريان ورودي به سيم داغ در مقاومت الکتريکي آن به ازاي طول سيم به دست مي‌آيد، بنابراين مقدار هدايت حرارتي از رابطه (۹) محاسبه مي‌گردد:

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

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



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



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

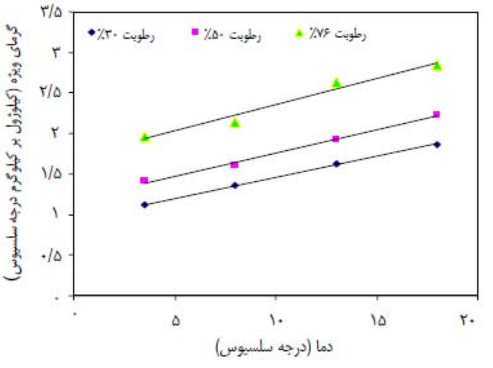
از منبع برق جريان مستقيم جهت توليد حرارت با ولتاژ ۲۴ ولت و جريان ۰/۶۶ آمپر به عنوان منبع توان پراب استفاده شد. نمونه‌هايي که بر روي پراب قرار داشتند گرم شده تا دماي پراب طي ۵ تا ۷ ثانيه به دماي ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسيوس بيشتر از دماي اوليه برسد. در طي اين مراحل دماي نمونه بر حسب زمان، با فاصله زماني يک ثانيه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

به منظور اندازه‌گيري ضريب انتقال حرارت دانه‌هاي انار از روش سيم داغ استفاده شد (شکل ۳). دانه‌هاي انار درون استوانه‌اي که سيم داغ در آن نصب شده است به آرامي ريخته شد. در هنگام پر کردن استوانه به بدنه آن ضرباتي با دست به آرامي زده شد تا حد ممکن 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 ترموکوپل T براي اندازه‌گيري دماي مرکز پراب و از سيم کنستانتين براي سيم گرمکن به دليل اين که مقاومت کنستانتين 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.

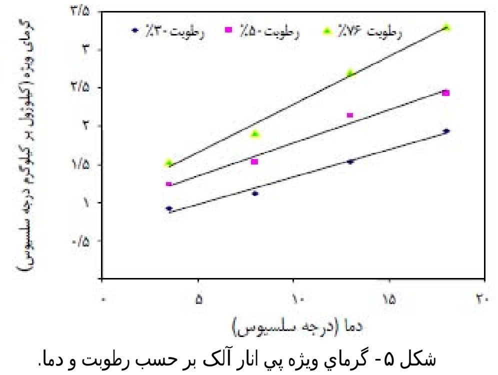
نتايج و بحث

گرماي ويژه

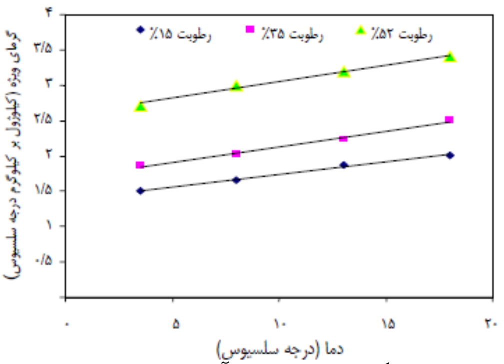
۵۸/۵ درصد وزني انار آلک را دانه و ۴۱/۵ بقيه را پوست و پي تشکيل داده‌اند. تغييرات گرماي ويژه دانه، پي و پوست انار با دما و رطوبت به ترتيب در شکل‌هاي۴، ۵ و۶ آورده شده است.



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



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



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

مقادير حداقل و حداكثر گرماي ويژه دانه، پوست و پي به ترتيب در بازه ۱/۱۲۷ تا ۲/۷۸۹، ۱/۵۱۶ تا ۳/۴۱۱، ۰/۹۳۱ تا ۳/۲۶ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس قرار داشت. با افزايش رطوبت، همانند دما، مقدار گرماي ويژه افزايش يافت. رطوبت و دما هر دو تاثير معني‌داري بر گرماي ويژه قسمت‌هاي مختلف انار در سطح یک درصد داشتند. دليل افزايش گرماي ويژه انار در اثر افزايش رطوبت به دليل اين است كه آب گرماي ويژه نسبتاً بالايي دارد. (Tansakul & Chaisawang, 2006). آناليز رگرسيون نشان داد كه يک رابطه خطي معني‌دار بين متغير وابسته (C_p) و متغيرهاي مستقل دما (T) و محتواي رطوبت (Mc) وجود داشت. با استفاده از داده‌هاي آزمايش براي هر قسمت از انار معادله رياضي كه بتواند گرماي ويژه را پيش بيني كند، تعيين شد (روابط ۱۰ تا ۱۲).

(۱۰) گرماي ويژه 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 ويژه 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 ويژه پوست

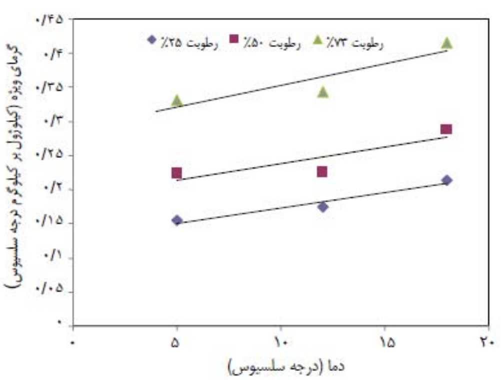
$$C_p = 0.7045 + 0.0413(T) + 0.0347(Mc)$$

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

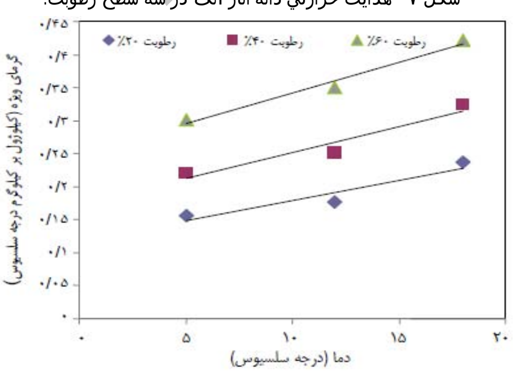
مقايسه بين مقادير اندازه‌گيري شده و پيش‌بيني شده مقادير گرماي ويژه نشان داد كه حداكثر تفاوت آنها در محدوده ±۰/۰۹ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس مي‌باشد كه بيانگر دقت مطلوب معادلات برازش شده مي‌باشد. افزايش گرماي ويژه انار در اثر افزايش دما و محتواي رطوبتي، با نتايج قبلي محققان مطابقت دارد. گرماي ويژه گندم بهاره در دماي۳۳/۵- تا ۲۱/۸ درجه سلسيوس و رطوبت ۱ تا ۲۳%، به صورت خطي در محدوده ۱/۰۵۴ تا ۲/۵۲ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس تغيير كرد (Muir & Viravanichai, 1972). بررسي محققان نشان داد كه گرماي ويژه سبوس برنج با افزايش دما و رطوبت، به صورت خطي در بازه ۱/۷۰۲ تا ۲/۱۸۹ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس تغيير كرد (Narain et al., 1978). با افزايش دما و رطوبت در بازه ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسيوس و ۱۰/۲۴ تا ۸۹/۶۸%، گرماي ويژه قارچ‌ها به صورت خطي در محدوده ۱/۷۲ تا ۳/۹۵ كيلوژول بر كيلوگرم درجه سلسيوس تغيير كرد (Shrivastava & Datta, 1999). گرماي ويژه پسته به عنوان تابعي از دما و رطوبت توسط Razavi & Taghizadeh (2007) تعيين شد. آن‌ها نشان دادند كه گرماي ويژه چهار رقم پسته ايراني تابعي از دما و رطوبت است.

هدايت حرارتي

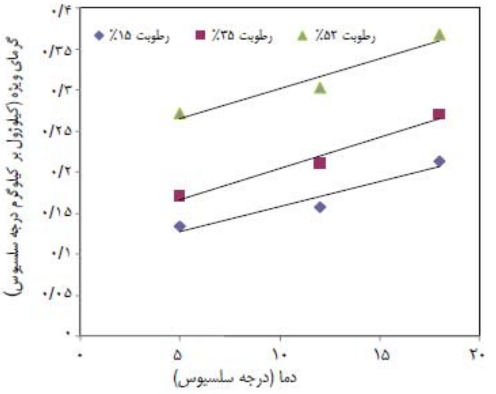
هدايت حرارتي دانه (شكل ۷)، پي (شكل ۸) و پوست (شكل ۹) براي انار آلک به ترتيب بين ۰/۱۵ تا ۰/۴۲، ۰/۱۵ تا ۰/۴۱ و ۰/۱۳ تا ۰/۳۷ وات بر متر درجه سلسيوس تغيير كرد. واضح است كه در يک دماي ثابت، با افزايش رطوبت، مقدار هدايت حرارتي افزايش مي‌يابد. با آناليز ضرايب رابطه هدايت حرارتي با رطوبت و دما مشخص شد كه رطوبت و دما هر دو تأثير معني‌داري در سطح ۱% بر روي هدايت حرارتي داشت. در ميان كليه عناصر تشكيل دهنده موادغذايي مانند آب، پروتئين، كربوهيدرات و چربي، هدايت حرارتي آب از همه بيشتر است (Mohsenin, 1980)، بنابراين با كاهش محتواي رطوبتي، هدايت حرارتي كاهش مي‌يابد.



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



شکل ۸- هدايت 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 (۴/۵ تا ۲۵%) و دما (۶- تا ۲۰ درجه سلسيوس)، در محدوده ۰/۱۳۸۲ تا ۰/۱۶۷ وات بر متر درجه سلسيوس تغيير مي‌کند (Chandra & Muir, 1971). مطالعات نشان داد که هدايت گرمايي قارچ با افزايش دما در بازه ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسيوس و رطوبت در بازه ۱۰/۲۴ تا ۷۹/۶۸%، از ۰/۲۰۸۴ 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_ε	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.