

علیرضا سالاری کیا^{۱*}، محمد حسین آق خانی^۲ و محمد حسین عباسپور فرد^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد،

alireza_salarikia@yahoo.com

۲- دانشیار و ۳- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در میان محصولات بومی کشور ایران، پسته مقام اول صادرات در بخش کشاورزی و مقام دوم صادرات غیرنفتی را به خود اختصاص داده است. با توجه به اهمیت فرآوری پسته به عنوان یک محصول صادراتی، ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز دو رقم پسته ایرانی (کله قوچی و بادامی)، در چهار سطح رطوبتی (رطوبت اولیه، ۱۵، ۲۵ و ۴۰٪ بر پایه تر) و سه سطح دمایی (۴۰، ۵۰ و ۶۰°C) به روش دیکرسون اندازه گیری شد. بدین منظور دستگاه دیکرسون در کارگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفت. ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز در هر دو رقم با افزایش درصد رطوبت به صورت منحنی درجه دوم در محدوده $0.0539 \times 10^{-6} - 0.217$ ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. این پارامتر با افزایش دما در برخی موارد روند افزایشی و در برخی موارد روند کاهشی نشان داد. در هر دو رقم مورد مطالعه اثر رطوبت و دما در سطح ۱٪ معنی دار شد؛ هرچند اثر رطوبت به مراتب بیشتر از اثر دما بود. همچنین ضریب نفوذ حرارتی دانه ها با اختلاف معنی داری بیشتر از ضریب نفوذ حرارتی مغز بود ولی اختلافی بین ارقام مشاهده نشد. در نهایت نیز مدل های ریاضی با ضریب تبیین بالا به منظور پیش بینی ضریب نفوذ حرارتی بر حسب رطوبت و دما ارائه شد. نتایج تحلیل رگرسیونی نشان داد که مدل درجه دوم، بهترین مدل برای پیش بینی ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز پسته می باشد.

واژه های کلیدی: پسته، روش دیکرسون، ضریب نفوذ حرارتی

پسته^۱ به عنوان یک محصول استراتژیک جایگاه خاصی در بین تولیدات کشاورزی ایران دارد و اهمیت اقتصادی آن بر هیچکس پوشیده نیست. این محصول به دلیل طعم مطبوع و ارزش غذایی بالا یکی از محبوب ترین دانه های روغنی در سراسر دنیا به شمار می رود. پسته به صورت خام یا پخته مصرف شده و در انواع شیرینی، دسر، شکلات، بستنی، سوسیس و کالباس و همچنین در صنعت داروسازی کاربرد دارد (Bayram, 2011; Kashaninejad and Tabil, 2009; Aktas and Polat, 2007). پسته سرشار از پروتئین، اسیدهای چرب غیر اشباع، ویتامین و مواد معدنی مورد نیاز بدن است. مغز پسته عموماً حاوی ۲۵٪ پروتئین (عمدتاً اسیدهای آمینه ضروری)، ۱۶٪ کربوهیدرات (عمدتاً ساکارز) و ۵۵ درصد روغن (اسیدهای چرب غیر اشباع) است (Aktas and Polat, 2007). در حال حاضر پسته از نظر صادرات در بین محصولات کشاورزی مقام اول و در بین صادرات غیرنفتی کشور مقام دوم را داراست و ایران به عنوان بزرگترین صادرکننده پسته در دنیا شناخته می شود. بر اساس اعلام سازمان خوار و بار جهانی (فائو)^۲، ایران در سال ۲۰۱۰ بیش از ۴۷٪ کل پسته دنیا را تولید کرده و درآمدی بالغ بر ۱/۱۵ میلیارد دلار از صادرات این محصول نصیب ایران شده است (FAO, 2010). از این رو استفاده از شیوه های مدرن در زمینه تولید، فرآوری و عرضه این محصول به منظور حفظ ایران در صدر صادرات جهانی پسته با توجه به فعالیت رقبای جدی از قبیل آمریکا، ترکیه، سوریه و چین امری بدیهی است.

محصولات کشاورزی و مواد غذایی در طی مراحل نگهداری و فرآوری تحت تیمارهای مختلف حرارتی قرار می گیرند. طراحی و عملی کردن تمام این فرآیندها نیاز به داشتن پارامترهای حرارتی است. حرارت دادن و حرارت گرفتن بیش از حد در طی فرآیندهای حرارتی باعث تغییر بافت، قهوه ای و چروک شدن، از بین رفتن ویتامین ها و در نهایت کاهش ارزش غذایی محصول می شود (Figura and Teixeira, 2007). پارامترهای حرارتی نظیر ظرفیت گرمایی ویژه^۳، ضریب انتقال حرارتی^۴ و ضریب نفوذ حرارتی^۵ در مواد بیولوژیکی و محصولات کشاورزی به منظور تحلیل و شبیه سازی شدت و مقدار انتقال حرارت در فرآیندهای حرارتی و همچنین طراحی و بهینه سازی تجهیزات استفاده می شود (Fasina et al., 2003).

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه اندازه گیری پارامترهای حرارتی محصولات کشاورزی انجام گرفته است. تحقیقات قبلی به وضوح نشان می دهد که رطوبت و دما تاثیر زیادی بر ضریب نفوذ حرارتی محصولات کشاورزی و مواد غذایی دارد. Loklari et al. (1957) با استفاده از روشی مشابه روش دیکرسون، ضریب نفوذ حرارتی سه رقم توتون را تعیین و گزارش کردند که این پارامتر با افزایش رطوبت در محدوده ۲۰-۲۰۰ درصد روند کاهشی و در محدوده رطوبت ۴۰-۲۰۰ درصد روند افزایشی داشته است. Hobani and Tolba (1995) ضریب نفوذ حرارتی سه رقم جو را با استفاده از روش دیکرسون بر حسب رطوبت اندازه گیری و گزارش کردند که با افزایش درصد رطوبت ضریب نفوذ حرارتی به صورت خطی کاهش یافت. (Sing and (2000)

¹ Pistachio

² FAO

³ Specific Heat

⁴ Thermal Conductivity

⁵ Thermal Diffusivity



Goswami ضریب نفوذ حرارتی زیره سبز را در محدوده رطوبتی $20/5-1/8$ درصد تعیین و گزارش کردند که این پارامتر با افزایش دما افزایش ولی با افزایش رطوبت ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. (Yang et al. (2002) ضریب نفوذ حرارتی بذر گل گاوزبان را اندازه گیری و گزارش کردند که با افزایش رطوبت مقدار آن در بازه $2/32-3/18 \cdot 10^{-7} m^2/s$ کاهش یافت. (Bitra et al. (2010) ضریب نفوذ حرارتی دانه، مغز و پوسته بادام زمینی را بر حسب درصد رطوبت اندازه گیری و گزارش دادند که با افزایش رطوبت ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز کاهش یافت، در حالی که ضریب نفوذ حرارتی پوسته ها افزایش نشان داد.

بررسی منابع نشان داد که تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه تعیین ضریب نفوذ حرارتی دانه پسته صورت نگرفته است. (Hsu et al. (1991) اثر رطوبت بر خواص حرارتی پسته را بررسی کردند. آنها ضریب نفوذ حرارتی پسته رقم کرمان را در دمای اتاق و در محدوده رطوبت $40-5$ درصد (بر پایه تر) تعیین و گزارش کردند که با افزایش رطوبت، ضریب نفوذ حرارتی در محدوده $0/032-0/048 \cdot 10^{-6} m^2/s$ کاهش یافت. (Kouchakzadeh and Tavakoli (2009) اثر دما و رطوبت را در محدوده دمایی $93-50$ °C و محدوده رطوبت $52-3$ درصد (بر پایه خشک) بر برخی خواص حرارتی پسته های ایرانی تعیین کردند. آنها ضریب نفوذ حرارتی را با استفاده از روش منبع حرارتی خطی اندازه گیری و گزارش کردند که این پارامتر با افزایش دما کاهش و با افزایش رطوبت تا رطوبت حدود 11% افزایش و بعد از آن کاهش یافت. طبق بررسی منابع صورت گرفته هیچ تحقیقی در زمینه تعیین ضریب نفوذ حرارتی مغز پسته یافت نشد. هدف از انجام این تحقیق اندازه گیری ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز دو رقم پسته، در چهار سطح رطوبتی و سه سطح دمایی است.

مواد و روش ها

انتقال حرارت در محصولات کشاورزی و مواد غذایی معمولاً به صورت انتقال حرارت ناپایدار یا گذرا رخ می دهد. ضریب نفوذ حرارتی نرخ انتشار گرما از طریق رسانش در مواد یا به عبارت دیگر قابلیت مواد در انتقال گرما (k) نسبت به قابلیت آنها در ذخیره گرما (ρC_p) را بیان می کند و طبق رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$\alpha \quad (1)$$

روش دیکرسون^۱ یک روش مستقیم برای اندازه گیری ضریب نفوذ حرارتی است که با داشتن داده های تغییر دما بر حسب زمان در داخل نمونه تحت شرایط انتقال حرارت حالت گذرا ضریب نفوذ حرارتی قابل محاسبه است. این روش در سال ۱۹۶۵ توسط فردی به نام دیکرسون ارائه شد. تجهیزات این آزمایش شامل یک حمام آب با دمای یکنواخت و ثابت است که در آن یک استوانه با ضریب انتقال حرارتی بالا محتوی نمونه آزمایشی قرار گرفته است. یک ترموکوپل به منظور ثبت دمای مرکز نمونه روی محور استوانه قرار گرفته است (شکل ۱). سر و ته استوانه با استفاده از یک ماده عایق (مثل تفلون) آب بندی شد تا علاوه بر جلوگیری از نفوذ آب به داخل نمونه ها، از انتقال حرارت محوری از سر و ته استوانه به داخل نمونه نیز جلوگیری شود. نمونه ها از ارتفاع حدود

¹ Dickerson Method



۱۵ سانتی متری به داخل استوانه ریخته می شوند تا فشردگی یکسانی داشته باشند. بعد از فرار گرفتن استوانه محتوی نمونه ها در زیر آب افزایش دمای مرکز استوانه تا زمانی که به دمای حمام آب برسد ثبت می شود. روش دیکرسون رایج ترین روش اندازه گیری ضریب نفوذ حرارتی توده محصولات کشاورزی و مواد غذایی و نیز ضریب نفوذ حرارتی مایعات است. برای این منظور دستگاه دیکرسون در کارگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شد (شکل ۱).

در این شرایط با توجه به اینکه فقط گرادیان شعاعی دما وجود دارد معادله انتقال حرارت فوریه در مختصات استوانه ای

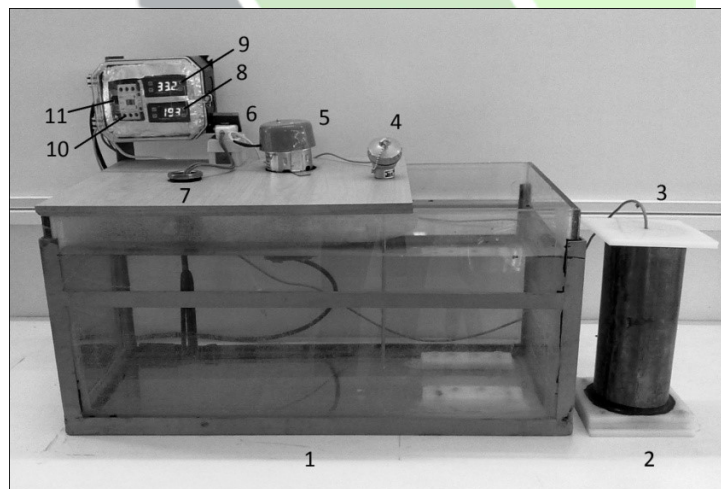
به صورت معادله (۲) ساده می شود.

$$\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

با حل این معادله با شرایط مرزی مشخص ضریب نفوذ حرارتی به دست می آید. در صورتی که طول استوانه استفاده شده محدود باشد حل معادله (۲) منجر به معادله (۳) می شود (Stumbo, 1973).

$$\alpha \quad (3)$$

در این معادله α ضریب نفوذ حرارتی در دمای R, T شعاع و h نصف ارتفاع استوانه (متر) و f_{h_i} پارامتر نرخ انتقال حرارت است که برابر شیب نمودار نیمه لگاریتمی $\text{Log} (T_s - T_0)/(T_s - T)$ بر حسب زمان می باشد. T_0 دمای نمونه در لحظه $t=0$ و T_s دمای حمام آب بر حسب درجه سانتی گراد است (Teixeira et al., 1969; Jaramillo and Hernandez, 1999).



شکل ۱. دستگاه دیکرسون (۱) مخزن آب (۲) استوانه مسی محتوی نمونه (۳) ترموکوپل قرائت دمای مرکز استوانه (۴) ترموکوپل قرائت دمای آب (۵) همزن (۶) کلید قطع و وصل دستی المنت (۷) المنت (۸) ترمومتر قرائت دمای مرکز استوانه (۹) ترموستات تنظیم دمای آب (۱۰) کنتاکتور (۱۱) فیوز

در این تحقیق سعی شد تا از دو رقم پسته که از نظر شکل ظاهری تفاوت زیادی دارند استفاده شود. از این رو رقم کله

قوچی از بین ارقام فندقی شکل پسته که نسبتا گرد بوده و نسبت طول به عرض آن کمتر از ۱/۵ است و رقم بادامی از بین ارقام



بادامی شکل پسته که نسبتاً کشیده و دراز بوده و نسبت طول به عرض آن بیشتر از ۱/۵ است انتخاب شد (شکل ۲). ارقام تهیه شده برای انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شد. برای تهیه مغز، پسته‌ها به صورت دستی و بدون اینکه آسیبی به مغز برسد پوست کنی شدند.



شکل ۲. نمونه‌ها (۱) مغز کله قوچی (۲) دانه کله قوچی (۳) مغز بادامی (۴) دانه بادامی

به منظور تعیین درصد رطوبت اولیه محصول از استاندارد آون هوای داغ با دمای $2 \pm 103^\circ\text{C}$ و تا زمانی که اختلاف وزن نمونه‌ها کمتر از ۰/۰۵ گرم شود استفاده شد (Razavi and Taghizadeh, 2006). کلیه آزمایش‌ها در محدوده رطوبتی بین درصد رطوبت اولیه محصول (رطوبت در هنگام انبار داری و عرضه به بازار که حدود ۵٪ است) تا رطوبت ۴۰٪ (رطوبت معمول در زمان برداشت پسته در باغ) و محدوده دمایی ۴۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد (دمای معمول در خشک‌کن‌های هوای داغ) انجام گرفت (Hsu *et al.*, 1991; Razavi *et al.*, 2006; Razavi and Taghizadeh, 2006; Kouchakzadeh and Tavakoli, 2009).
به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، آزمایش‌ها در قالب آزمون فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با چهار متغیر مستقل رقم (کله قوچی و بادامی)، محصول (دانه و مغز)، درصد رطوبت و دما انجام شد. کلیه آزمایشات در چهار سطح رطوبتی درصد رطوبت اولیه، رطوبت ۱۵٪، ۲۵٪ و ۴۰٪ و سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در سه تکرار انجام گرفت. تحلیل‌های آماری و رسم نمودار با استفاده از نرم‌افزارهای *SigmaPlot 12.0.0*، *SPSS 16.0*، *Excel 2007* انجام شد.

به منظور ارزیابی اثر متغیرهای وابسته بر ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز پسته مورد مطالعه نتایج تجزیه واریانس داده ها

در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس (مجموع مربعات) اثر محتوی رطوبتی و دما بر ضریب نفوذ حرارتی

F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
۹۲۹/۹۲۴**	۲/۳۴۰ E-۴	۴۷	۰/۰۱۱	تیمار
۳/۸۳۰ n.s.	۹/۷۰۱ E-۷	۱	۱/۴۷۶ E-۶	رقم (V)
۲۹۷۸۰**	۰/۰۰۸	۱	۰/۰۰۸	دانه/مغز (NK)
۳۸۰۳**	۰/۰۰۱	۳	۰/۰۰۳	رطوبت (M)
۱۳۲/۴۴۱**	۳/۳۵۵ E-۵	۲	۶/۷۱۰ E-۵	دما (T)
۲/۰۸۵ n.s.	۵/۲۸۱ E-۷	۳	۱/۵۸۴ E-۶	V*M
۴/۱۳۷*	۱/۰۴۷ E-۶	۲	۲/۰۹۵ E-۶	V*T
۲/۰۳۲ n.s.	۵/۱۴۷ E-۷	۶	۳/۰۸۸ E-۶	M*T
۱/۸۹۷ n.s.	۴/۸۰۵ E-۷	۶	۲/۸۸۳ E-۶	V*M*T
۰/۴۷۵ n.s.	۱/۲۰۳ E-۷	۶	۷/۲۱۹ E-۷	V*NK*M*T
	۲/۵۳۳ E-۷	۹۶	۲/۴۳۲ E-۵	خطا
		۱۴۳	۰/۱۷۰	کل

** معنی دار در سطح ۱٪

* معنی دار در سطح ۵٪

n.s. غیر معنی دار

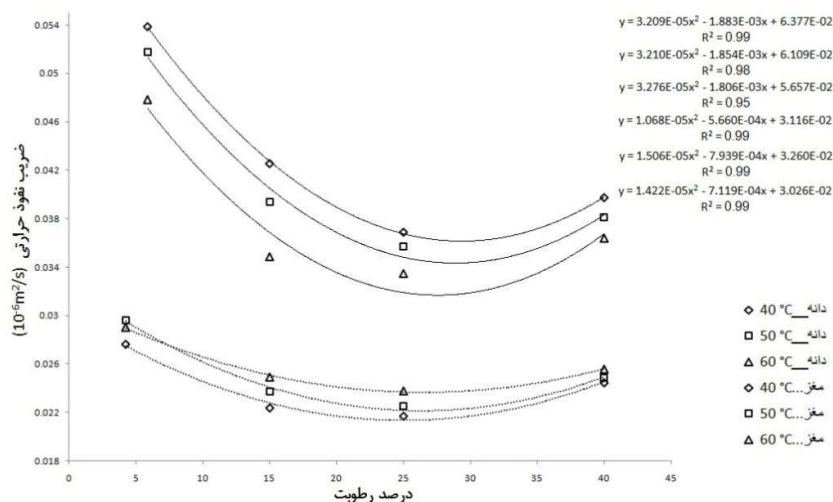
نتایج جدول ۱ نشان می دهد که اثرات اصلی سه فاکتور دانه و مغز، رطوبت و دما در سطح ۱٪ معنی دار و اثر اصلی

فاکتور رقم نیز غیر معنی دار شده است. در واقع تفاوت در ارقام مورد مطالعه هیچ تاثیری بر ضریب نفوذ حرارتی نداشته است.

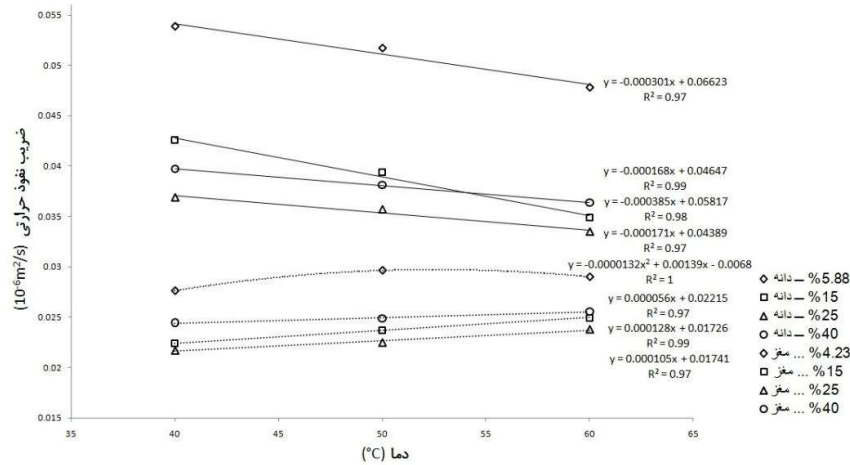
همچنین تمامی اثرات متقابل فاکتورها به جز اثر متقابل رقم*دما در سطح ۵٪، غیر معنی دار شده اند.

تغییرات ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم کله قوچی بر حسب رطوبت و دما در نمودار شکل های ۳ و ۴ و تغییرات

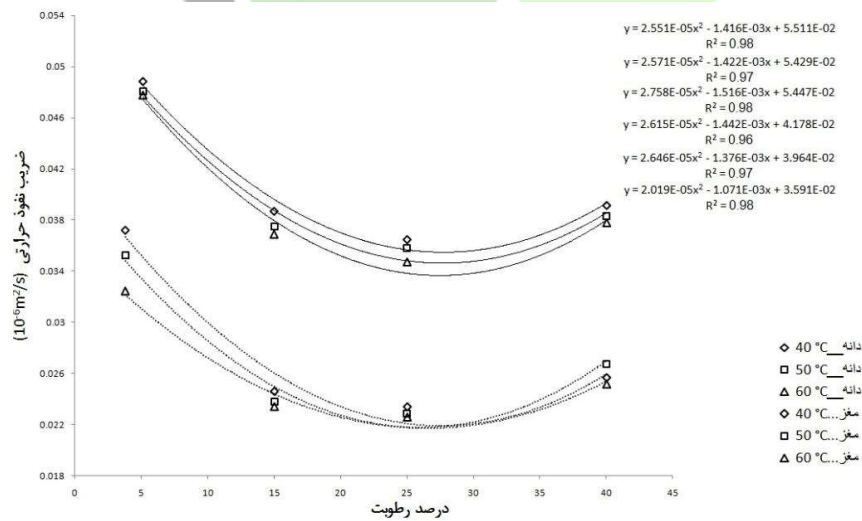
ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم بادامی بر حسب رطوبت و دما در نمودار شکل های ۵ و ۶ آورده شده است.



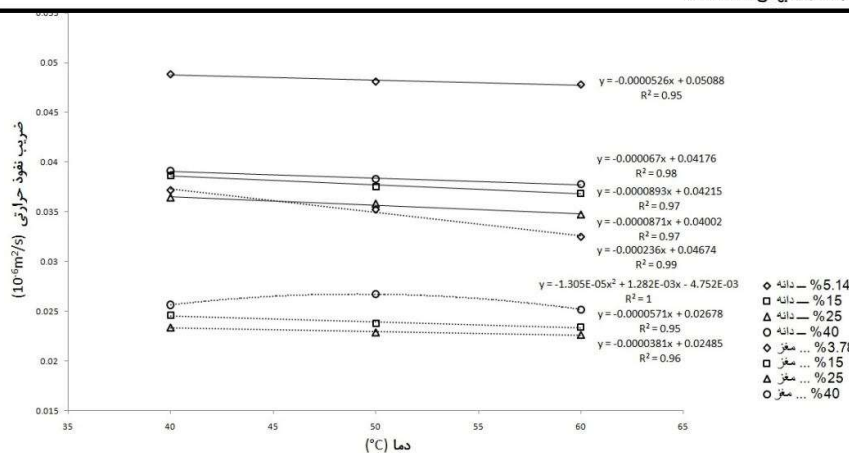
شکل ۳. اثر رطوبت بر ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم کله قوچی



شکل ۴. اثر دما بر ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم کله قوچی



شکل ۵. اثر رطوبت بر ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم بادامی



شکل ۶. اثر دما بر ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم بادامی

به طور کلی با افزایش رطوبت و دما ضریب نفوذ حرارتی دانه رقم کله قوچی در محدوده $0.0334-0.0539 \times 10^{-6} m^2/s$ ، ضریب نفوذ حرارتی مغز رقم کله قوچی در محدوده $0.0217-0.0296 \times 10^{-6} m^2/s$ ، ضریب نفوذ حرارتی دانه رقم بادامی در محدوده $0.0347-0.0488 \times 10^{-6} m^2/s$ و بالاخره ضریب نفوذ حرارتی مغز رقم بادامی در محدوده $0.0226-0.0372 \times 10^{-6} m^2/s$ تغییر می‌کند. با توجه به نمودار شکل های ۳ و ۵ ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم های کله قوچی و بادامی با افزایش درصد رطوبت به صورت منحنی درجه دوم تغییر می‌کند، به این ترتیب که در رطوبت های زیر ۳۰-۲۵ درصد با افزایش درصد رطوبت، ضریب نفوذ حرارتی کاهش و در رطوبت های بالای ۳۰-۲۵ درصد با افزایش درصد رطوبت، افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودار شکل ۶ ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم بادامی با افزایش دما به صورت خطی با شیب بسیار کم کاهش یافته است (به جز ضریب نفوذ حرارتی در رطوبت ۴۰ درصد که با افزایش دما به صورت منحنی درجه دوم ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است). در مورد دانه رقم کله قوچی نیز طبق نمودار شکل ۴ ضریب نفوذ حرارتی با افزایش دما به صورت خطی کاهش یافته است در حالی که ضریب نفوذ حرارتی مغز رقم کله قوچی مطابق شکل ۴ با افزایش دما به صورت خطی افزایش یافته است (به جز ضریب نفوذ حرارتی در رطوبت اولیه که با افزایش دما به صورت منحنی درجه دوم ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است).

نتایج نشان می‌دهد که در هر دو رقم پسته مورد مطالعه ضریب نفوذ حرارتی دانه ها با اختلاف معنی داری بیشتر از ضریب نفوذ حرارتی مغز است که احتمالاً به دلیل پوسته استخوانی شکل دانه هاست که نسبت به مغز، ضریب نفوذ حرارتی بالاتری دارد. به منظور بحث دقیق تر مطالعه ضریب نفوذ حرارتی پوسته پسته مورد نیاز است.

در گزارشات ارائه شده توسط محققین پیشین در مورد اندازه گیری ضریب نفوذ حرارتی نتایج متفاوتی مشاهده می‌شود. با تغییر رطوبت و دما، ضریب نفوذ حرارتی در بعضی موارد کاهش و در بعضی موارد افزایش داشته است، در مواردی نیز روند کاهشی و سپس افزایشی و یا برعکس مشاهده شده است. علت این تفاوت ها در نتایج، وابسته بودن ضریب نفوذ حرارتی به ضریب انتقال حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی است. (Hsu et al. (1991). کاهش ضریب نفوذ حرارتی یک رقم پسته را با افزایش درصد رطوبت گزارش کردند. Loklari et al. (1957). گزارش کردند که ضریب نفوذ حرارتی سه رقم توتون از رطوبت های ۲ تا



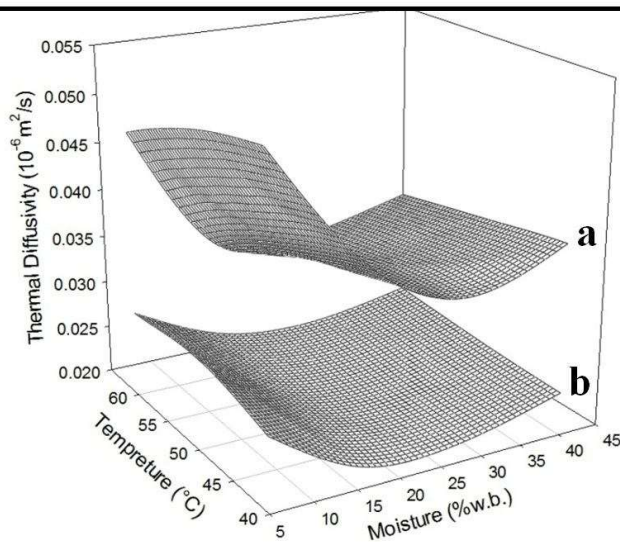
۲۰ درصد روند کاهش و در محدودهٔ رطوبت های ۲۰ تا نزدیک ۴۰ درصد روند افزایشی نشان می‌دهد. (Sing and Goswami, 2000) نیز ضریب نفوذ حرارتی زیره سبز را اندازه گیری و نتیجه مشابهی را گزارش کردند، یعنی با افزایش درصد رطوبت، ضریب نفوذ حرارتی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. نیری و همکاران (۱۳۸۸) ضریب نفوذ حرارتی کود گاوی را اندازه گیری و نتیجه متفاوتی را گزارش کردند، به این صورت که با افزایش رطوبت از ۲۰-۴۰ درصد ضریب نفوذ حرارتی افزایش و در رطوبت های بالاتر از ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. در برخی تحقیقات کاهش خطی ضریب نفوذ حرارتی با افزایش درصد رطوبت گزارش شده است (Hobani and Tolba, 1995؛ جو؛ Yang et al., 2002، بذر گل گاوزبان؛ Bitra et al., 2010، دانه و مغز بادام زمینی). در تحقیقات دیگری با افزایش درصد رطوبت، ضریب نفوذ حرارتی افزایش یافته است (Dutta et al., 1988، نخود؛ Bitra et al., 2010، پوسته بادام زمینی). در برخی تحقیقات مرتبط با تغییر دما، نتیجه ای مشابه نتیجه حاصل برای مغز رقم کله قوچی گزارش شده است یعنی با افزایش دما، ضریب نفوذ حرارتی افزایش داشته است (Sing and Goswami, 2000، زیره سبز). در مواردی نیز نتیجه ای مشابه نتیجه حاصل برای دانه رقم کله قوچی و دانه و مغز رقم بادامی گزارش شده است یعنی با افزایش دما، کاهش ضریب نفوذ حرارتی مشاهده شده است (Dutta et al., 1988، نخود).

با توجه به معنی دار شدن اثر رطوبت و دما، مدل های جدول ۲ با استفاده از تحلیل رگرسیون چند متغیره برای پیش بینی ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز دو رقم پسته مورد مطالعه ارائه می‌شود. بالا بودن مقادیر ضریب تبیین (R^2) نشان از نزدیک بودن مقادیر مدل های پیشنهادی به مقادیر واقعی دارد. نتایج تجزیه رگرسیون نشان داد که مدل درجه دوم، بهترین مدل برای پیش بینی ضریب نفوذ حرارتی پسته می باشد لذا در این مدل ها اثر رطوبت به صورت توان دوم و اثر دما به صورت خطی لحاظ شده است.

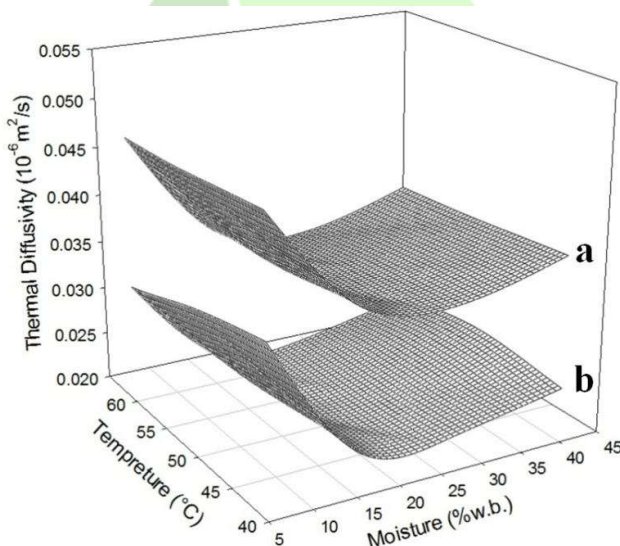
جدول ۲. مدل های ارائه شده برای پیش بینی ضریب نفوذ حرارتی بر حسب درصد رطوبت و دمای محصول

محصول	R^2	مدل ($10^{-6}m^2/s$)
دانه کله قوچی	۰/۹۶۵	α
مغز کله قوچی	۰/۹۵۱	α
دانه بادامی	۰/۹۷۶	α
مغز بادامی	۰/۹۳۰	α

نتایج تجزیه رگرسیون نشان داد که مدل های ارائه شده همگی در سطح ۱٪ معنی دار هستند. اثر همزمان دما و رطوبت بر ضریب نفوذ حرارتی دانه رقم بادامی در نمودارهای سه بعدی شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. این نمودارها به شکل رویه هایی هستند که محور دمای آن ها به صورت خطی و محور رطوبتشان به صورت سهمی تغییر می‌کند. در واقع مدل های پیشنهادی در جدول ۲ معادلات رگرسیونی این رویه ها هستند.



شکل ۷. اثر رطوبت و دما بر ضریب نفوذ حرارتی دانه (a) و مغز (b) رقم کله قوچی



شکل ۸. اثر رطوبت و دما بر ضریب نفوذ حرارتی دانه (a) و مغز (b) رقم بادامی

نتیجه گیری کلی

ضریب نفوذ حرارتی دانه و مغز رقم های مورد مطالعه با افزایش درصد رطوبت به صورت منحنی درجه دوم در محدوده ضریب نفوذ $10^{-6} m^2/s$ $0.0217-0.0539$ تغییر پیدا کرد، به این ترتیب که با افزایش رطوبت در رطوبت های زیر ۳۰-۲۵ درصد ضریب نفوذ حرارتی به صورت توان دوم کاهش و در رطوبت های بالای ۳۰-۲۵ درصد به صورت توان دوم افزایش یافت. نتایج نشان داد که در هر دو رقم پسته کله قوچی و بادامی ضریب نفوذ حرارتی دانه ها با اختلاف معناداری بیشتر از ضریب نفوذ حرارتی مغز است. مقایسه نمودارها و نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر رطوبت بر تغییرات ضریب نفوذ حرارتی به مراتب بیشتر از اثر دما است.

- ۱- نیری، م.، کیانمهر، م.، عرب محمد حسینی، ا. و حسن بیگی بیدگلی، س.ر. ۱۳۸۸. تعیین ضریب انتشار کود گاوی با استفاده از حل یک بعدی معادله فوریه. مجله مهندسی بیوسیستم ایران ۱: ۸۶-۷۹.
- 2- Aktas, T., and R. Polat. 2007. changes in the drying characteristics and water activity values of selected pistachio cultivars during hot air drying. *Journal of Food Process Engineering* 30: 607-624.
 - 3- Bayram, M. 2011. Comparison of unsplit inshell and shelled kernel of the pistachio nuts. *Journal of Food Engineering* 107: 374-378.
 - 4- Bitra, V.S.P., S. Banu, P. Ramakrishana, G. Narender, and A.R. Womac. 2010. Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. *Biosystems Engineering* 10: 503-512.
 - 5- Dickerson, R.W. 1965. An apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology* 19: 198-204.
 - 6- Dutta, S.K., V.K. Nema, and R.K. Bhardwaj. 1988. Thermal properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research* 39: 269-275.
 - 7- Fasina, O.O., B.E. Farkas, and H.P. Fleming. 2003. Thermal and Dielectric Properties of Sweetpotato Puree. *International Journal of Food Properties* 6: 461-472.
 - 8- Figura, L.O., and A.A. Teixeira. 2007. *Food Physics (Physical Properties Measurement and Applications)*. Springer Berlin Heidelberg New York. ISBN 978-3-540-34191-8.
 - 9- Anonymous. FAOSTAT. 2013. available on fao.org
 - 10- Hobani, A.I., and M.H. Tolba. 1995. Bulk thermal conductivity and diffusivity of barley. *King Saud University, Agricultural Research Center, Research Bulletin* 53: 5-17.
 - 11- Hsu, M.H., J.D. Mannaperuma, and R.P. Singh. 1991. Physical and thermal properties of pistachios. *Journal of Agricultural Engineering Research* 49: 311-321.
 - 12- Jaramillo-Flores, M.E., and H. Hernandez-Sanchez. 1999. Thermal diffusivity of soursop (*Annona muricata* L.) pulp. *Journal of Food Engineering* 46: 139-143.
 - 13- Kashaninejad, M., and L.G. Tabil. 2009. Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. *Journal of Food Engineering* 90: 104-109.
 - 14- Kouchakzadeh, A., and T. Tavakoli. 2009. The effect of moisture and temperature on thermophysical properties of Iranian pistachios. *World Applied Sciences Journal* 7: 1552-1558.
 - 15- Loklari, E.E., W.D. Galloway, and M. Samfield. 1957. The thermal conductivity of tobacco. *Tobacco Science* 28: 28-32.
 - 16- Razavi, S.M.A., and M. Taghizadeh. 2006. The specific heat of pistachio nuts as affected by moisture content, temperature, and variety. *Journal of Food Engineering* 79: 158-167.
 - 17- Razavi, S.M.A., A. Rafe, T. Mohammadi Moghaddam, and A. Mohammad Amin. 2006. Physical properties of pistachio nut and its kernel as a function of moisture content and variety. Part II. Gravimetric properties. *Journal of Food Engineering* 81: 218-225.
 - 18- Singh, K.K., and T.K. Goswami. 2000. Thermal properties of cumin seed. *Journal of Food Engineering* 45: 181-187.
 - 19- Stumbo, C.R. 1973. *Thermobacteriology in food processing* (2nd ed.). New York, Academic Press.
 - 20- Teixeira, A.A., J.R. Dixon, J.W. Zahradnik, and G.E. Zinsmeister. 1969. Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction heated foods. *Food Technology* 23: 845-850.



- 21- Yang, W., S. Sokhansanj, J. Tang, and P. Winter. 2002. Determination of thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of borage seeds. Biosystems Engineering 82: 169-176.





Mathematical models to predict Thermal Diffusivity of nut and kernel of two pistachio varieties

AliReza Salari Kia^{1*}, Mohammad Hossein Aghkhani² and Mohammad Hossein Abbaspour-Fard³

- 1- Graduated Student of Mechanics of Agricultural Engineering, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, alireza_salarikia@yahoo.com
2- Associate Professor and 3- Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Among the native Iranian produce, pistachio has the first place in agricultural export and second place in non-petroleum export. Given the importance of pistachio processing as an exportable product, thermal diffusivity of nut and kernels of two varieties of Iranian pistachio (Kalle-Ghochi and Badami) was investigated in this study. This property was measured using Dickerson method at four levels of moisture content (initial moisture content, 15%, 25% and 40% w.b.) and three levels of temperature (40, 50 and 60°C). For this purpose, Dickerson set up was made in Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. With increasing moisture content, thermal diffusivity of nut and kernels in both varieties varied nonlinearly in the range of 0.0217-0.0539 $10^{-6}m^2/s$. However, this parameter varied with temperature with different trends. In both varieties, the differences among the data were significant at 1% level of probability; however, the effect of moisture content was greater than that of temperature. Based on observations, in both varieties the thermal diffusivity of nuts was significantly greater than that of kernels but there was no difference between the varieties. Finally, regression models with high R^2 values were developed to predict the thermal diffusivity of pistachio varieties as a function of moisture content and temperature.

Keywords: Dickerson method, pistachio, thermal diffusivity