

مدل سازی فرآیند برشته کردن مغز بادام زمینی با استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز

هادی باقری^{a*}، مهدی کاشانی نژاد^b، امان محمد ضیائی فر^c، مهرا ن اعلمی^d

^a دانشجوی دکتری مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^b استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

^c استادیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

^d دانشیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱/۳۱

چکیده

مقدمه: برشته کردن یکی از متداول ترین اشکال فرآوری مغزها بوده و هدف از آن افزایش پذیرش کلی فرآورده است. استفاده از هوای داغ به منظور برشته کردن مغزها، اغلب با مشکلاتی همچون نرخ پائین تولید، کیفیت پائین محصول و بالا بودن هزینه انرژی همراه است، بنابراین ضروری است که از روش های مناسب جدید برای برشته کردن بادام زمینی استفاده گردد. از روش های جدید برشته کردن مغزها می توان به استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز اشاره کرد.

مواد و روش ها: در این مطالعه مغزهای بادام زمینی با استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز تحت تیمارهای دمای (۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی گراد) و توان (۱۳۰، ۱۶۵ و ۲۰۰ وات) قرار گرفتند و میزان رطوبت نهایی و انرژی مصرفی سامانه ترکیبی تحت شرایط مختلف اندازه گیری شد. سینتیک برشته شدن مغز بادام زمینی مورد بررسی قرار گرفت و برای مدل سازی برشته شدن مغز بادام زمینی از ۵ مدل لایه نازک استفاده شد. به منظور تعیین ضرایب این مدل ها، از آنالیز رگرسیون غیر خطی استفاده شد.

یافته ها: نتایج مدل سازی نشان دهنده برتری مدل دوجمله ای و مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل ها برای برازش داده های آزمایشگاهی بود. این دو مدل، RMSE بسیار پایین، ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین متعادل شده ($adj R^2$)، بالایی داشتند. مقدار ضریب نفوذ موثر در محدوده $10^{-7} \times 0.54 - 10^{-7} \times 1.915$ متر مربع بر ثانیه قرار داشت و با افزایش دما و توان افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دما و توان، مقدار رطوبت نهایی مغز بادام زمینی کاهش یافت و مقدار مصرف انرژی با افزایش دمای هوای داغ افزایش یافت، این در حالی است که با افزایش توان لامپ، مقدار انرژی مصرفی سامانه کاهش یافت.

نتیجه گیری: نتایج حاصل از تحقیق نشان دهنده این است که استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز یک روش مقرون به صرفه از نظر مصرف انرژی به شمار می آید و با افزایش توان از میزان مصرف انرژی سامانه کاسته شد، بنابراین با به کارگیری توان های بالا می توان باعث کاهش مصرف انرژی در سامانه های ترکیبی شد.

واژه های کلیدی: انرژی، بادام زمینی، برشته کردن، مدل سازی

مقدمه

بادام زمینی (*Arachis hypogaea* L) یک ماده غذایی با ارزش تغذیه‌ای بالا و از خانواده لگومینوزها می‌باشد (Burns, 2010). این ماده غذایی با ارزش حاوی ۳۶ تا ۵۴ درصد روغن، ۱۶ تا ۳۶ درصد پروتئین و ۱۰ تا ۲۰ درصد کربوهیدرات می‌باشد. در حال حاضر بعد از پسته به عنوان یکی از محبوب‌ترین آجیل‌ها در بین مردم کشورهای مختلف به خصوص ایران مطرح است. ارزش غذایی بالا، خوشمزه بودن، هضم راحت و کالری بالا از ویژگی‌هایی است که باعث شده این محصول جزء آجیل‌های پرمصرف شناخته شود، به علاوه بادام زمینی منبع سرشار از مواد معدنی و ویتامین‌های مختلف به شمار می‌آید (Vollmann & Rajcan, 2010).

برشته کردن یکی از مراحل اساسی در فرایند تولید قهوه، مغزها، آجیل‌ها و خشکبار به شمار می‌آید، که این مرحله باعث ایجاد تغییرات مهم فیزیکی، شیمیایی، ساختاری و حسی در دانه فرآوری شده می‌شود (Ozdemir & Devres, 2000; Pittia et al., 2001; Saklar et al., 2001). به عبارتی دیگر برشته کردن یکی از متداول‌ترین شکل‌های فرآوری دانه بادام زمینی است که هدف از آن افزایش پذیرش کلی فرآورده است. این فرایند باعث تغییر و بهبود معنی‌دار عطر و طعم، بافت و ظاهر دانه‌ها می‌شود، در نتیجه فرآورده‌های حاصل نسبت به آجیل‌های خام بسیار خوشمزه‌تر و لذیذتر می‌باشند. در حال حاضر روش متداول برشته کردن صنعتی، استفاده از برشته-کن‌های جریان هوای داغ و سطح داغ است که با اشکالاتی همچون اتلاف عظیمی انرژی حرارتی، بالا بودن زمان عملیات، پائین بودن کیفیت محصول برشته شده و غیر متراکم دستگاه‌های برشته کن هوای داغ و سطح داغ، همراه است (Hosseini Ghaboos et al., 2015; Kumar et al., 2009; Jun et al., 2011). از روش‌های جدید برشته کردن مغزها می‌توان به استفاده از سامانه مادون قرمز و سامانه ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز اشاره کرد (Nachaisin et al., 2016).

با توجه به اهمیت برشته کردن در ریز ساختار و خصوصیات بافتی و نقش انتقال جرم و رطوبت در این پارامترها بررسی خصوصیات برشته شدن لایه نازک بادام زمینی با استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ و مادون قرمز

ضروری به نظر می‌رسد. به منظور بهبود کیفیت بادام زمینی برشته شده، لازم است که تغییرات سینتیکی رطوبت، بافت، میکروبی و فیزیکی در طول برشته کردن مورد بررسی قرار بگیرد. سینتیک برشته شدن در دانه‌ها و آجیل‌ها وابسته به خصوصیات انتقال حرارت و جرم محصول در حال برشته شدن است و دانش توزیع دما و رطوبت در محصول برای طراحی دستگاه و فرایند، کنترل کیفیت، انتخاب شرایط نگهداری و خصوصیات حمل و نقل حیاتی و ضروری است (Mayer, 1985; Perren & Escher, 1996). مدل‌های ریاضی که توصیف کننده مکانیسم‌های خشک کردن در مواد غذایی هستند، می‌توانند اطلاعات درباره رطوبت و دما برای طراحی فرایندها و تجهیزاتی را فراهم کنند (Parry, 1985; Parti, 1993). از میان مدل‌های ریاضی، مدل‌های لایه نازک خشک کردن دارای کاربرد گسترده‌ای اند چرا که استفاده از آنها نیازمند داده‌ها و اطلاعات پیچیده همچون مدل‌های تئوری نیست (Madamba et al., 1996). مدل‌های لایه نازک خشک شدن برای بسیاری از میوه‌ها، سبزیجات و بسیاری از مواد غذایی که توسط روش‌های مختلف خشک شدند، مورد استفاده قرار گرفته است (Jayas et al., 1991; Karathanos & Belessiotis, 1999; Yaldiz et al., 2001; Midilli et al., 2002; Akpinar & Bicer, 2008; Thuwapanichayanan et al., 2008). اما در مورد مدل‌سازی سینتیک برشته شدن با استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز، مطالعه‌ای صورت نگرفته است. خصوصیات سینتیک برشته شدن مغز فندق با استفاده از هوای داغ توسط Ozdemir و Devres (۱۹۹۹) مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهشگران برای بررسی سینتیک برشته شدن از چندین مدل نیمه تئوری و تجربی استفاده کردند و نشان دادند که مدل تجربی تامسون قادر به توصیف سینتیک برشته شدن می‌باشد. همچنین ضریب نفوذ و انرژی فعال سازی برای برشته کردن مغز فندق با استفاده از قانون دوم فیک و آرنیوس توسط این محققان تعیین و مورد محاسبه قرار گرفت.

با توجه به اینکه برشته شدن یک مرحله ضروری در فرآوری مغزها و دانه‌های روغنی محسوب می‌شود و با توجه به محدودیت و فقدان مطالعات در زمینه تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی در حین برشته شدن به خصوص

شد و در ادامه فرایند برشته کردن بر روی بادام زمینی‌ها انجام گرفت. در این مرحله رطوبت مغز بادام زمینی به حدود ۸/۲۷ درصد بر پایه ماده خشک رسید.

- فرآیند برشته کردن

قبل از قرار دادن نمونه‌ها در اتاقک برشته‌کن، برشته‌کن به مدت ۱۵ دقیقه برای ایجاد شرایط ثابت روشن گردید. مغزهای بادام زمینی به صورت لایه نازک در اتاقک برشته‌کن قرار گرفت و سپس برشته کردن نمونه‌ها براساس تیماربندهی جدول ۱ انجام گردید. برای این امر کاهش وزن نمونه‌های مغز بادام زمینی طی زمان توسط ترازوی دیجیتال تعبیه شده در دستگاه با دقت ۰/۰۱ گرم در فواصل ۱۰ ثانیه ثبت گردید.

- برازش داده‌ها و برآورد ضرایب ثابت در مدل‌های ریاضی

مدل‌سازی رفتار برشته‌شدن بادام زمینی اهمیت زیادی در بررسی خصوصیات برشته‌کردن بادام زمینی دارد. معمولاً رفتار افت رطوبت در طی زمان در فرآیند برشته‌شدن توسط معادلات نمایی به خوبی توصیف می‌شود. چندین مدل برای بیان سرعت افت رطوبت در طی برشته‌شدن لایه نازک مغزها پیشنهاد شده است (Ozdemir & Devres, 1999). در این مطالعه اطلاعات تجربی برشته‌کردن بادام زمینی در روش‌های مختلف برشته‌کردن با مدل‌های خشک‌کردن (برشته کردن) لایه نازک برازش شدند. تعدادی از این مدل‌ها برای بررسی روند برشته شدن لایه نازک بادام زمینی انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). تخمین شاخص‌های مدل‌های تجربی از داده‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار سیگماپلات ۱۲ توسط

بحث خشک شدن در طول فرآیند برشته شدن، و با توجه به اهمیت و اثرپذیری بحث خشک شدن بر سایر فاکتورها و تغییرات فیزیکی و شیمیایی، فرآیند خشک شدن در حین برشته کردن بادام زمینی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. برای نیل به این هدف، خصوصیات لایه نازک خشک شدن مغز بادام زمینی در طول فرآیند برشته شدن به صورت تجربی تعیین شد و در ادامه با استفاده از مدل‌های لایه نازک مورد برازش قرار گرفت و بهترین مدل انتخاب گردید. همچنین رطوبت نهایی مغزها، ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی مصرفی دستگاه‌ها نیز برای برشته کردن مغز بادام زمینی مورد محاسبه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

بادام زمینی خام (توده محلی مینودشت (رقم گلی)) از مزرعه مینودشت تهیه و پس آن به روش آفتابی خشک گردید و سپس تا زمان آزمایش در محل خشک و عاری از رطوبت نگهداری شد. بعد از سایزبندی، نمونه‌های با ابعاد یکسان برای انجام آزمایش انتخاب گردید. میزان رطوبت اولیه در مغزهای بادام زمینی حدود ۵/۱ درصد بر پایه ماده خشک بود و متوسط ابعاد بادام زمینی استفاده شده برای این آزمایش به ترتیب حدود ۱۸/۶۸، ۹/۶۳ و ۷/۸۵ میلی‌متر بود.

- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای برشته کردن نمونه‌ها ابتدا محلول ۲۵ درصد نمک طعام تهیه شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، مغز بادام زمینی‌ها به مدت ۳۰ دقیقه با نسبت یک به پنج در محلول آب نمک قرار گرفت. در طی این مدت نمونه‌ها به آرامی و با سرعت یکنواخت هم زده شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها از آب نمک خارج و توسط فیلتر پارچه‌ای آب نمک اضافی آن‌ها گرفته

جدول ۱- تیمارهای مورد مطالعه (شرایط دمایی و توانی مورد استفاده)

نوع سیستم	دمای هوای داغ (°C)	توان مادون قرمز (W)	کد نمونه‌ها
سامانه هوای داغ- مادون قرمز	۱۰۰	۱۳۰	HA100-IR130
		۱۶۵	HA100-IR165
		۲۰۰	HA100-IR200
	۱۲۰	۱۳۰	HA120-IR130
		۱۶۵	HA120-IR165
		۲۰۰	HA120-IR200

مدل سازی فرآیند برشته کردن مغز بادام زمینی با هوای داغ- مادون قرمز

جدول ۲- مدل‌های مورد استفاده برای برازش داده‌ها

شماره	نام مدل	مدل ریاضی
۱	لوئیس (نیوتنی) (نمایی)	$MR = \exp(-at)$
۲	پیچ	$MR = \exp(-a.tb)$
۳	لگاریتمی	$MR = a \exp(-bt) + c$
۴	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-bt) + c \exp(-dt)$
۵	میدیلی	$MR = a \exp(-bt c) + dt$

پایه فاکتوریل و تجزیه واریانس (GLM) توسط نرم‌افزار آماری Minitab 16 انجام شد. مقایسه میانگین در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفت.

یافته‌ها

سینتیک کاهش رطوبت طی برشته شدن در شکل ۱ آورده شده است. جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس برخی از خصوصیات کیفی مغزهای بادام زمینی برشته شده را نشان می‌دهد. اثر مستقل دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر پارامترهای کیفی در جدول ۴ نشان داده شده است و اثر متقابل دوگانه آن‌ها در شکل‌های ۲، ۴ و ۵ آورده شده است. جدول ۵ نشان دهنده نتایج تجزیه و تحلیل آماری و ۶ شاخص‌های دو مدل دو جمله‌ای و لگاریتمی در شرایط متفاوت برشته کردن در سامانه ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز را نشان می‌دهد. در شکل ۳ نسبت رطوبت مشاهده شده و پیش‌گویی شده بوسیله مدل دو جمله‌ای مقایسه شده است.

بحث

مطالعه سینتیک برشته شدن برای رسیدن به اطلاعاتی درباره سرعت و کاهش نرخ رطوبت برای برشته کردن صحیح محصول ضروری می‌باشد. سینتیک افت رطوبت طی برشته کردن مغزها به عوامل مختلفی مانند دما، رطوبت اولیه مغز و غیره وابسته است و با تغییر شرایط فرایند سینتیک برشته شدن نیز تغییر می‌کند (Ozdemir & Devres, 1999). شکل ۱ منحنی‌های سینتیک برشته

رگرسیون غیرخطی روی تمام تیمارهای آزمایشی برشته‌شدن انجام شد. بدین ترتیب ضرایب و ثابت‌ها در فرایند برشته‌شدن محاسبه شد. عامل‌های متعددی نظیر ضریب تعیین^۱ (R^2)، ضریب تعیین متعادل شده^۲ ($Adj R^2$)، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها^۳ (RMSE) و متوسط انحراف نسبی مدل (P) برای ارزیابی برازش مدل‌های تجربی بر داده‌های آزمایشی استفاده شد (Madamba et al., 1996; Palipane & Driscoll, 1994).

- اندازه‌گیری رطوبت نهایی

رطوبت نهایی براساس وزن خشک ماده محاسبه شد. بدین ترتیب که ۳ عدد مغز بادام زمینی جدا و درون آن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد (Kashaninejad et al., 2007). جهت به‌دست آوردن داده‌های قابل قبول این آزمایش در ۴ تکرار انجام شد و میانگین داده‌ها گزارش شد.

- محاسبه میزان انرژی مصرفی

میزان انرژی مصرفی توسط دستگاه آنالیز توان لوترون (مدل DW-6090A) اندازه‌گیری شد. این دستگاه سر راه مصرف برق توسط دستگاه برشته‌کن قرار گرفت و جریان ورودی به دستگاه خشک‌کن ابتدا از دستگاه آنالیز توان عبور نموده و ثبت شد. نتایج به‌صورت فایل اکسل ذخیره شده و محاسبات توسط نرم افزار اکسل انجام گرفت.

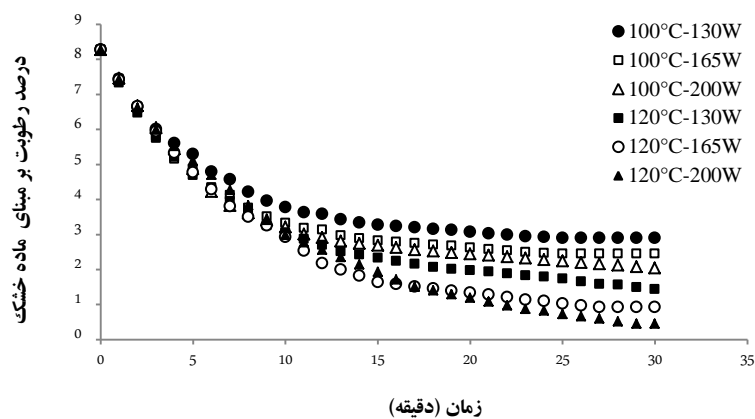
- تجزیه و تحلیل آماری

تأثیر متغیرهای مستقل و برهمکنش آنها بر رطوبت و میزان انرژی مصرفی با استفاده از طرح کاملاً تصادفی بر

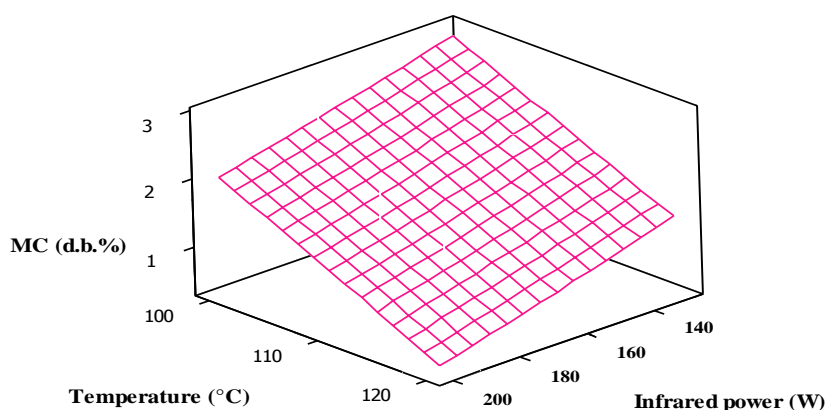
¹ Coefficient of Determination

² Adjusted R-Squared

³ The Root Mean Square Error (RMSE)



شکل ۱- اثر دما و توان‌های مختلف سامانه ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز بر سینتیک کاهش رطوبت



شکل ۲- اثر برهمکنش دوگانه دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر میزان رطوبت نهایی مغز بادام زمینی (%, db.)

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس مغز بادام زمینی برشته شده با سامانه ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز

P	F	میانگین مربعات تعدیل شده	مجموع مربعات تعدیل شده	مجموع مربعات متوالی	درجه آزادی	منابع تغییرات	ویژگی مورد نظر
۰/۰۰۱	۱۶۷۸/۹۴	۶/۸۵۱۶	۶/۸۵۱۶	۶/۸۵۱۶	۱	دما	رطوبت نهایی (%, db.)
۰/۰۰۵	۲۱۲/۵۷	۰/۸۶۷۵	۱/۷۳۴۹	۱/۷۳۴۹	۲	توان	
۰/۰۰۳	۱۸/۲۸	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۲	۲	توان × دما	
		۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳	۶	خطا	
				۸/۵۹۶۰	۱۱	کل	
۰/۰۰۰	۵۳۳۸/۳۷	۰/۰۶۷۳۳۵۷	۰/۰۶۷۳۳۵۷	۰/۰۶۷۳۳۵۷	۱	دما	میزان مصرف انرژی (kwh)
۰/۰۰۰	۱۲۰۴۱/۸۴	۰/۱۵۱۹۳۹	۰/۳۰۳۸۷۸	۰/۳۰۳۸۷۸	۲	توان	
۰/۰۰۰	۲۲۹۸/۸۶	۰/۰۲۹۰۰۶	۰/۰۵۸۰۱۲	۰/۰۵۸۰۱۲	۲	توان × دما	
		۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۰۷۶	۶	خطا	
				۰/۴۲۹۳۲۴	۱۱	کل	
۰/۰۰۰	۱۴۵۶۱/۳۰	۱۸/۲۸۵۹	۱۸/۲۸۵۹	۱۸/۲۸۵۹	۱	دما	ضریب نفوذ موثر رطوبت (m ² /s)
۰/۰۰۰	۲۳۴۲/۳۴	۲/۸۱۵۹	۵/۶۳۱۸	۵/۶۳۱۸	۲	توان	
۰/۰۰۰	۹۰۵/۸۷	۱/۱۳۷۶	۲/۲۷۵۲	۲/۲۷۵۲	۲	توان × دما	
		۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۷۵	۶	خطا	
				۲۶/۲۰۰۵	۱۱	کل	

مدل سازی فرآیند برشته کردن مغز بادام زمینی با هوای داغ - مادون قرمز

جدول ۴- اثر مستقل دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر پارامترهای کیفی

پارامتر کیفی مورد نظر	دمای هوای داغ (درجه سانتی گراد) توان لامپ مادون قرمز (وات)				
	۲۰۰	۱۶۵	۱۳۰	۱۲۰	۱۰۰
رطوبت نهایی (%, db.)	۱/۲۳۶۶ ^a	۱/۶۸۱۴ ^b	۲/۱۶۷۷ ^a	۰/۹۳۹۶ ^b	۲/۴۵۰۸ ^a
میزان مصرف انرژی (kwh)	۰/۶۰۶۴ ^c	۰/۷۴۶۹ ^b	۰/۹۹۱۵ ^a	۰/۸۵۶۵ ^a	۰/۷۰۶۷ ^b
ضریب نفوذ موثر رطوبت $10^{-7} \times (m^2/s)$	۴/۲۹۰ ^a	۳/۴۷۴ ^b	۲/۶۱۳ ^c	۴/۶۹۳ ^a	۲/۲۲۴ ^b

حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد است.

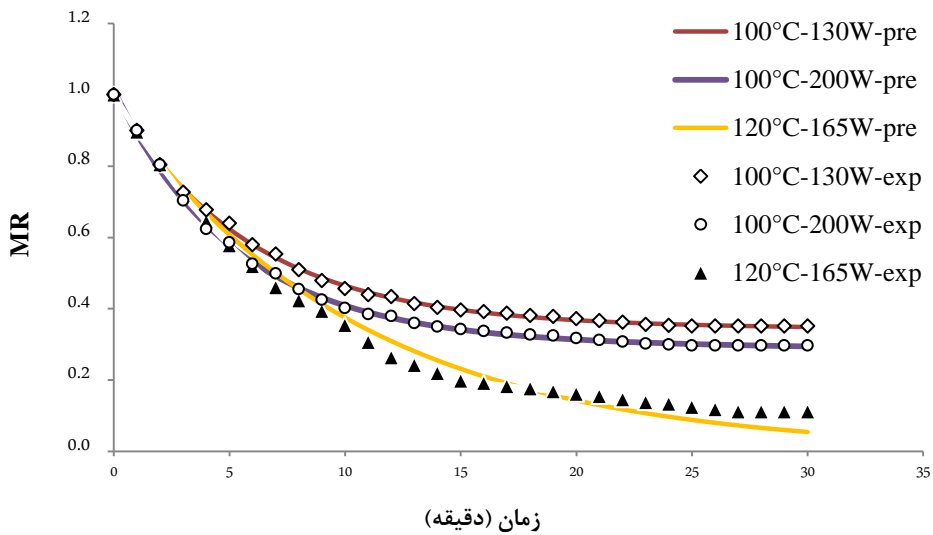
جدول ۵- نتایج تجزیه و تحلیل آماری و برازش مدل‌های تجربی بر داده‌های آزمایشی

کد تیمار	نام مدل	SSE	R ²	Adj. R ²	RMSE	P (%)
HA100-IR130	نیوتنی	۰/۰۰۹۸۵۹	۰/۶۹۰۸	۰/۶۶۷۹	۰/۰۹۹۲۹۴	۲۰/۳۸۵۱۷
	پیچ	۰/۰۰۱۲۴۲	۰/۹۱۴۵	۰/۹۰۸۱	۰/۰۳۵۲۳۸	۶/۵۱۸۸۹
	لگاریتمی	۰/۰۰۰۰۳۰	۰/۹۹۸۰	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۵۴۶	۰/۸۹۱۷۱
	دو جمله ای	۰/۰۰۰۰۲۹۵	۰/۹۹۸۰	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۵۴۲۷	۰/۸۷۸۷۰
	میدیلی	۰/۰۰۰۰۲۶۲	۰/۹۸۲۸	۰/۹۸۱۵	۰/۰۱۶۳۱۲	۳/۲۲۹۳۸
HA100-IR165	نیوتنی	۰/۰۱۰۱۷	۰/۷۱۴۰	۰/۶۹۲۸	۰/۱۰۰۸۴۶	۲۳/۹۶۶۲۸
	پیچ	۰/۰۰۱۶۱۱	۰/۹۰۵۵	۰/۸۹۸۵	۰/۰۴۰۱۳۹	۸/۱۱۹۹۹
	لگاریتمی	۰/۰۰۰۰۳۹	۰/۹۹۷۸	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۶۲۵	۱/۱۹۳۹۸
	دو جمله ای	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۶۰۸	۱/۰۶۹۹
	میدیلی	۰/۰۰۰۰۳۴۳	۰/۹۸۱۲	۰/۹۷۹۸	۰/۰۱۸۵۱۹	۴/۲۸۸۰
HA100-IR200	نیوتنی	۰/۰۰۸۲۰۲	۰/۷۷۳۸	۰/۷۵۷۰	۰/۰۹۰۵۷	۲۳/۸۵۱۷۲
	پیچ	۰/۰۰۱۶۵۴	۰/۹۱۵۶	۰/۰۴۰۷	۰/۰۹۰۹۳	۲/۷۷۰۰۶
	لگاریتمی	۰/۰۰۰۰۱۳۶	۰/۹۹۳۴	۰/۹۹۲۹	۰/۰۱۱۶۴۷	۲/۷۱۰۸۰
	دو جمله ای	۰/۰۰۰۰۱۲۶	۰/۹۹۳۹	۰/۹۹۳۴	۰/۰۱۱۲۰۳	۲/۳۱۱۱۳
	میدیلی	۰/۰۰۰۰۴۲۹	۰/۹۷۹۴	۰/۹۷۷۸	۰/۰۲۰۷۲	۵/۳۱۰۳۱۰
HA120-IR130	نیوتنی	۰/۰۰۴۵۵۹	۰/۸۷۷۷	۰/۸۶۸۶	۰/۰۶۷۵۲	۲۱/۸۶۰۳
	پیچ	۰/۰۰۰۶۵۶	۰/۹۷۲۳	۰/۹۷۰۲	۰/۰۲۵۶۱۲	۷/۳۳۵۲۹
	لگاریتمی	۰/۰۰۰۰۷۰۵	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۶۹	۰/۰۰۸۳۹۶	۲/۷۲۹۷۱
	دو جمله ای	۰/۰۰۰۰۳۴۷	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۸۹	۰/۰۰۴۹۶	۱/۴۹۹۲۸
	میدیلی	۰/۰۰۰۰۲۴۲	۰/۹۹۰۱	۰/۹۸۹۳	۰/۰۱۵۵۴۸	۴/۹۰۲۴۳
HA120-IR165	نیوتنی	۰/۰۰۱۰۵۹	۰/۹۷۲۱	۰/۹۷۰۰	۰/۰۳۲۵۴۷	۱۷/۱۳۸۵۸
	پیچ	۰/۰۰۰۰۵۰۴	۰/۹۸۴۵	۰/۹۸۳۳	۰/۰۲۲۴۴۱	۹/۳۴۹۹
	لگاریتمی	۰/۰۰۰۰۹۰۶	۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۷۰	۰/۰۰۹۵۱۸	۳/۲۱۰۵۲۲
	دو جمله ای	۰/۰۰۰۰۹۰۶	۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۷۰	۰/۰۰۹۵۱۸	۳/۲۱۰۵۲۲
	میدیلی	۰/۰۰۰۰۷۲۱	۰/۹۹۷۷	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۸۴۹۱	۳/۱۵۳۳۱۰
HA120-IR200	نیوتنی	۰/۰۰۰۰۶۲۵	۰/۹۹۸۳	۰/۹۹۸۲	۰/۰۰۷۹۰۸	۲/۱۰۳۰۱
	پیچ	۰/۰۰۰۰۵۶۵	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۷۴۸۷	۲/۱۳۵۷۶
	لگاریتمی	۰/۰۰۰۰۵۱۵	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۵	۰/۰۰۷۱۷۷	۱/۹۴۰۰۸
	دو جمله ای	۰/۰۰۰۰۴۶۴	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۶۸۱۳	۱/۹۶۳۳۵۳
	میدیلی	۰/۰۰۰۰۵۱۵	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۵	۰/۰۰۷۱۷۷	۱/۹۳۹۵۱۸

جدول ۶- شاخص‌های دو مدل دو جمله‌ای و لگاریتمی در شرایط متفاوت برشته کردن

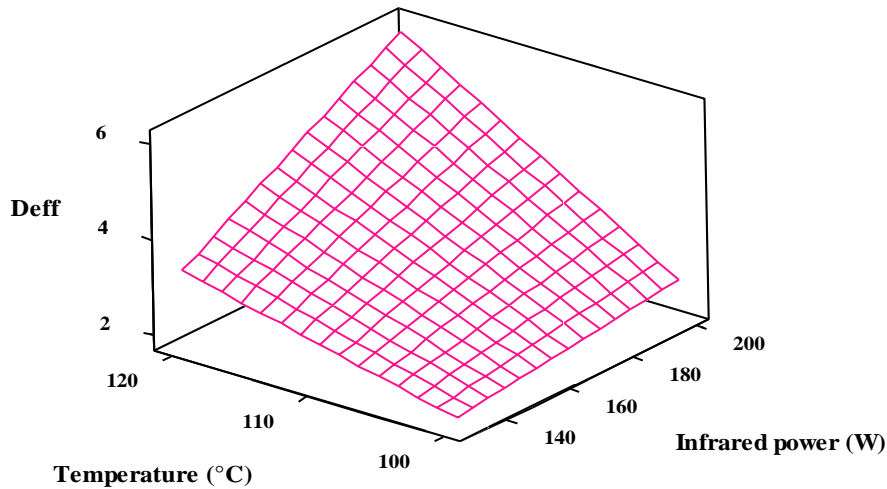
مدل لگاریتمی	مدل دو جمله‌ای	شاخص‌های مدل	تیمار
۰/۶۵۲۵	۰/۳۵۳۰	a	HA100-IR130
۰/۱۷۰۸	۰/۰۰۰۷	b	
۰/۳۴۶۲	۰/۶۴۶۵	c	
	۰/۱۷۳۴	d	
۰/۷۱۵۳	۰/۷۰۱۸	a	HA100-IR165
۰/۱۸۴۱	۰/۱۹۰۲	b	
۰/۲۹۴۶۱	۰/۳۱۰۲	c	
	۰/۰۰۲۰	d	
۰/۷۵۷۰	۰/۲۹۷۵	a	HA100-IR200
۰/۱۷۲۶	۰/۰۰۵۱	b	
۰/۲۶۰۳	۰/۷۲۴۱	c	
	۰/۱۸۵۲	d	
۰/۸۰۵۲	۰/۶۹۲۵	a	HA120-IR130
۰/۱۴۶۱	۰/۱۷۹۰	b	
۰/۱۸۶۱	۰/۳۱۰۶	c	
	۰/۰۱۸۳	d	
۰/۹۲۵۷	۰/۹۲۵۷	a	HA120-IR165
۰/۱۲۸۹	۰/۱۲۸۹	b	
۰/۰۸۵۴	۰/۰۸۵۴	c	
	۰/۰۰۸۱	d	
۰/۹۹۱۲	۰/۰۱۶۳	a	HA120-IR200
۰/۰۹۶۳	۲/۲۸۰۰	b	
۰/۰۰۰۱	۰/۹۸۳۹	c	
	۰/۰۹۶۴	d	

۶۵

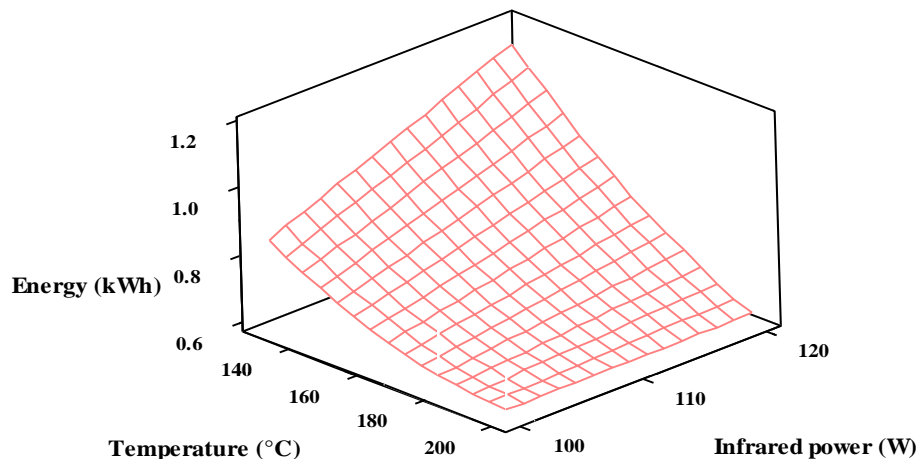


شکل ۳- مقایسه نسبت رطوبت مشاهده شده و پیش‌گویی شده بوسیله مدل دو جمله‌ای

مدل سازی فرآیند برشته کردن مغز بادام زمینی با هوای داغ - مادون قرمز



شکل ۴- اثر برهمکنش دوگانه دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر ضریب نفوذ موثر رطوبت (m^2/s)



شکل ۵- اثر برهمکنش دوگانه دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر میزان مصرف انرژی (kWh)

بررسی اثر توان لامپ مادون قرمز نیز نشان دهنده افزایش نرخ و شدت برشته شدن با افزایش توان لامپ می‌باشد. این موضوع به این دلیل است که با افزایش توان لامپ مادون قرمز، لایه سطحی و قسمت‌های داخلی مغز بادام زمینی به شدت گرم شده و در نتیجه باعث افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت می‌گردد و رطوبت به سرعت خارج می‌شود (Doymaz, 2012)

شکل ۱ نشان دهنده اثر دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر میزان رطوبت مغزها طی برشته کردن لایه نازک بادام زمینی می‌باشد. به گونه‌ای که بالاترین سینتیک کاهش رطوبت مربوط به مغز برشته شده با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و توان ۲۰۰ وات بود و پایین‌ترین سینتیک

شدن مغز بادام زمینی را به صورت درصد رطوبت بر پایه ماده خشک در طول زمان برشته شدن و در سطوح مختلف بر اساس جدول ۱ نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که محتوی رطوبت نمونه‌های بادام زمینی در طول برشته شدن بصورت مداوم و نمایی کاهش می‌یابد، همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود.

با افزایش دما سینتیک برشته شدن افزایش یافت (شکل ۱). علت افزایش سینتیک کاهش رطوبت و نرخ برشته شدن با افزایش دما به خاطر افزایش انرژی وارد شده به ملکول‌های آب در دماهای بالاتر می‌باشد به گونه‌ای که در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد فرایند برشته شدن با شدت و سرعت بیشتری انجام می‌شود (Doymaz, 2011).

میانگین خطا (RMSE) و کمترین مدل انحراف نسبی میانگین (P) انتخاب شد (Togrul & Pehlivan, 2002). نتایج آماری به دست آمده از مدل‌سازی برشته کردن بادام زمینی با استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در سطوح مختلف دمایی و توانی نشان داد که مدل دو جمله‌ای و مدل لگاریتمی بهترین مدل جهت برازش داده‌های این روش می‌باشد (جدول ۵)

برای انتخاب مدل مناسب جهت برازش داده‌ها باید انحراف نسبی میانگین (P) کمتر از ۱۰٪ باشد (Madamba et al., 1996; Palipane & Pehlivan, 1994). تمام مدل‌های مورد استفاده به جز مدل نیوتنی جهت برازش دارای این شرط بودند و دو مدل دوجمله‌ای و لگاریتمی دارای مقادیر P کمتر نسبت به سایر مدل‌ها بودند. بنابراین دو مدل یاد شده پیش‌گویی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها از داده‌های آزمایشی دارند و به خوبی ویژگی‌های برشته‌شدن لایه نازک مغز بادام زمینی را توصیف می‌کنند (شکل ۳). جزئیات آنالیز آماری این پنج مدل در جدول ۵ نشان داده شده است. عموماً دو مدل دوجمله‌ای و لگاریتمی توصیف بهتری را از رفتار برشته شدن از خود نشان دادند. این دو مدل RMSE بسیار پایین، ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین متعادل شده ($adj R^2$)، بالایی نیز داشتند.

همچنین جدول ۵ نشان داد که مدل میدلی در دما و توان‌های بالا از اعتبار بالای برای برازش داده‌ها برخوردار است این در حالی است که در دماها و توان‌های پائین مدل دوجمله‌ای و لگاریتمی دارای قابلیت برازش بهتری نسبت به سایر مدل‌ها هست. از طرفی با توجه به بالا بودن مقدار انحراف نسبی میانگین (P) برای مدل پیچ در برازش داده‌های فرآیند HA120-IR165، این مدل برای این فرآیند مناسب نیست.

مدل‌سازی سینتیک خشک کردن برای بسیاری از مواد غذایی از جمله، خشک کردن توت (Izli et al., 2014) و خشک کردن سیب (Wang et al., 2007) انجام شده است و نتایج این مطالعات نشان‌دهنده سازگاری مدل‌های مختلف بر سینتیک خشک شدن این محصولات کشاورزی می‌باشد. اما در مورد مدل‌سازی سینتیک برشته شدن مطالعه‌ای صورت نگرفته است به جز Ozdemir و Devres (۱۹۹۹) که نشان دادند که مدل تجربی تامسون قادر به توصیف سینتیک برشته شدن فندق می‌باشد.

کاهش رطوبت مربوط به مغز برشته شده با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و توان ۱۳۰ وات بود.

یکی از پارامترهای مهم که باید طی فرایند برشته کردن کنترل شود، میزان رطوبت نهایی مغز برشته شده است (Ozdemir & Devres, 1999). نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر میزان رطوبت نهایی مغزهای بادام زمینی در جدول ۳ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، اثر فاکتورهای دمای هوای داغ و توان لامپ و هم چنین اثر هم‌زمان و متقابل آن‌ها بر میزان رطوبت نهایی مغزها در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است ($P < 0.05$). همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، افزایش دمای برشته کردن باعث کاهش میزان رطوبت نهایی شده است. افزایش دمای برشته کردن از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش رطوبت نهایی به میزان ۶۱ درصد شد. که علت آن به خاطر تامین انرژی بالاتر در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

مطالعات انجام شده توسط Kaya و Kahyaoglu و (۲۰۰۶) و Bhattacharya و Prakash (۱۹۹۷) در ارتباط با برشته کردن دانه کنجد و نخود نشان داد که دما بطور معنی‌داری در طی برشته کردن بر از دست دادن رطوبت مؤثر است و با افزایش دما، کاهش رطوبت بیشتر اتفاق می‌افتد. بین توان لامپ مادون قرمز و میزان رطوبت رابطه معکوس وجود دارد و با افزایش توان لامپ از ۱۳۰ به ۱۶۵ وات کاهش میزان رطوبت به میزان ۲۲ درصد شد و استفاده از توان ۲۰۰ وات میزان رطوبت را به ۱/۲۳۶۶ درصد رساند. افزایش توان لامپ مادون قرمز باعث افزایش دمای برشته کن می‌گردد و این امر باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا، به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و در نتیجه در مدت زمان مورد نظر باعث کاهش بیشتر رطوبت می‌گردد (Doymaz, 2012). به طور کلی طی فرآیند برشته کردن، دانه‌های مغز بادام زمینی شکننده شده و از میزان رطوبت آنها کاسته می‌شود (Ozdemir & Devres, 1999)

بهترین مدل توصیف کننده روند برشته شدن لایه نازک بادام زمینی با بیشترین ضریب تعیین (R^2)، بیشترین ضریب تعیین متعادل شده ($Adj R^2$)، کمترین مربع

ضرایب دو مدل دو جمله‌ای و لگاریتمی برای هر تیمار برشته شدن محاسبه شد (جدول ۶). لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند برشته کردن مغز بادام زمینی با استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز توصیه می‌شود. نسبت رطوبت پیش‌گویی شده توسط دو مدل دو جمله‌ای و لگاریتمی در برابر نسبت رطوبت مشاهده شده در دما و توان های مختلف برشته‌شدن در شکل ۳ نشان داده شده است. این نتایج بیان می‌دارد که این دو مدل به خوبی داده‌های مشاهده شده نسبت رطوبت را در تمام تیمارهای آزمایشی پوشش می‌دهد.

با توجه به قرار گرفتن منحنی آهنگ برشته شدن بادام زمینی در مرحله سرعت نزولی، برای تشریح فرآیند برشته شدن بادام زمینی و بررسی ضریب نفوذ رطوبت از قانون دوم فیک استفاده شد. برای آنالیز تحلیلی، مغزهای دانه بادام زمینی به‌عنوان تیغه نامحدود در نظر گرفته شد. اثرات شیب حرارتی بر روی ضریب نفوذ حرارتی نادیده گرفته شد. تحت این شرایط انتقال رطوبت در داخل بادام‌زمینی به‌وسیله قانون دوم نفوذ فیک قابل توصیف می‌باشد.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (1)$$

که X برابر میزان رطوبت (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک)، D برابر با ضریب نفوذ موثر رطوبت (m^2/s)، t در این معادله زمان (ثانیه) و Z فاصله یا ضخامت برای نفوذ رطوبت می‌باشد. فرآیند نفوذ را می‌توان با استفاده از قانون فیک به صورت ریاضی توصیف کرد. روش‌های تحلیلی برای حل معادله (۱) در بسیاری از منابع ارائه شده که توسط Crank (۱۹۸۵) با در نظر گرفتن هندسه ماده غذایی و شرایط مرزی بیان گردیده است. حل تحلیلی معادله ۲ برای تیغه نامحدود به صورت زیر است.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4d^2}\right] \quad (2)$$

که M میزان رطوبت بر پایه ماده خشک در هر زمان، M_0 و M_e نشان دهنده میزان رطوبت تعادلی و رطوبت اولیه بر پایه ماده خشک، D ضریب نفوذ موثر رطوبت و d برابر با نصف ضخامت نمونه می‌باشد.

بررسی اثر دما، توان و هم چنین اثر همزمان و متقابل آن‌ها نشان دهنده اثر معنی‌دار این پارامترها بر ضریب نفوذ موثر رطوبت بود ($P < 0.05$) (جدول ۳) و شکل ۴ به ترتیب اثر شرایط مختلف برشته کردن به صورت مستقل و همزمان را بر میزان ضریب نفوذ نشان می‌دهد. ضریب نفوذ موثر رطوبت طی فرآیند برشته کردن در دماها و توان‌های مختلف سامانه ترکیبی، در دامنه $10^{-7} \times 10^{-6}$ یافت به طوری که بالاترین ضریب نفوذ موثر مربوط به دمای 120 هوای داغ و توان لامپ 200 وات بود.

با توجه به اینکه ضریب نفوذ موثر رطوبت به دما و ترکیب مواد بستگی دارد (Rizvi, 2005)، بنابراین ضریب نفوذ به شدت وابسته به دما و توان به کار گرفته است. افزایش ضریب نفوذ موثر رطوبت با افزایش دما و توان توسط محققان دیگر هم گزارش شده است (Doymaz, 2002; Doymaz & Pehlivan, 2012). این نتایج مشابه نتایج Ozdemir و Devres (۱۹۹۹) برای برشته کردن دانه‌های فندق در دما، زمان و سرعت جریان‌های هوای مختلف می‌باشد. این محققان گزارش دادند که طی برشته کردن دانه با افزایش دما، ضریب نفوذ موثر رطوبت پیدا کرد.

جدول ۴ اثر شرایط مختلف برشته کردن را بر میزان مصرف انرژی نشان می‌دهد. اثر دما و توان برشته کردن بر انرژی مصرفی و همچنین اثر همزمان دما و توان بر میزان مصرف انرژی معنی‌دار بود ($P < 0.05$) (جدول ۳). شکل ۵ نشان دهنده میزان مصرف انرژی در برشته کن ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز در دما و توان‌های مختلف است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، پائین‌ترین مقدار مصرف انرژی برای برشته کردن مغز بادام زمینی در دمای 100 درجه سانتی‌گراد و توان 200 درجه سانتی‌گراد دیده شد و بالاترین میزان مصرف انرژی مربوط به دمای 120 و توان 130 وات می‌باشد. در سامانه ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز با افزایش دما، میزان مصرف انرژی افزایش یافت، این در حالی است که با افزایش توان مصرفی لامپ مادون قرمز از میزان مصرف انرژی کاسته شد. نتایج مشابهی توسط Motevali و همکاران (۲۰۱۱) برای خشک کردن اسلایس‌های قارچ توسط سیستم خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ گزارش شده است. علت

arietinum). *International Journal of Food Science and Technology*, 32, 81-84.

Burns, S. P. (2010). Strategies for enhancing leaf spot (*Cercospora arachisicola* and *Cercosporidium personatum*) tolerance in peanut (*Arachis hypogaea* L.0. University of Florida.

Crank, J. (1985). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). New York: Oxford University Press.

Dadali, G. & Ozbek, B. (2008). Microwave heat treatment of leek: Drying kinetic and effective moisture diffusivity. *International Journal of Food Science Technology*, 43, 1443-1451.

Doymaz, I. (2011). Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *Journal Food Processing and Preservation*, 35(2), 280-289.

Doymaz, I. (2012). Drying of Pomegranate Seeds Using Infrared Radiation. *Food Science and Biotechnology*, 21, 1269-1275.

Doymaz, I. T. & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209-216.

Falade, K. O. & Abbo, E. S. (2007). Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 724-730.

Hosseini Ghaboos, S. H., Seyedain Ardabili, S. M., Kashaninejad, M., Asadi, G. & Alami, M. (2015). Mass Transfer Kinetics of Combined Infrared-Hot Air Drying of Pumpkin. *Food Science and Nutrition Journal*, 3, 14-23.

Izli, N., Yıldız, G., Unal, H., Isik, E. & Uylaser, V. (2014). Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of Goldenberry (*Physalis peruviana* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 9-17.

Jayas, D. S., Cenkowski, S., Pabis, S. & Muir, W. E. (1991). Review of thin layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9(3), 551-588.

Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, and J. & Demirci, A. (2011). Fundamentals and theory of infrared radiation. In: Pan, Z. Atungulu, G. G. (Eds.). *Infrared heating for food and agricultural processing*. New York. CRC press. 1019.

Kahyaoglu, T. & Kaya, S. (2006). Modeling of moisture, color and texture

کاهش میزان مصرف انرژی با افزایش میزان توان لامپ مصرفی این است که با افزایش توان لامپ مصرفی، المنت‌های گرم کننده هوای داغ به مدت زمان بیشتری خاموش مانده و در نتیجه مقدار انرژی کمتری مصرف می‌کند.

نتیجه‌گیری

برشته کردن باعث تغییر و بهبود معنی‌دار عطر، طعم، بافت و ظاهر مغزها می‌شود. در طی برشته کردن، مغز شکننده‌تر و تردتر می‌شود که اینها جزء ویژگی‌های معمول فرآورده‌های برشته شده می‌باشند، بنابراین برشته کردن یک مرحله اساسی در تولید مغزها به حساب می‌آید و کنترل و بهینه‌سازی آن اهمیت زیادی دارد. از این رو به کارگیری روش‌های جدید و مطالعه خصوصیات فیزیکی و سنتتیکی فرایند، مبرم و ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه خصوصیات سنتتیکی برشته شدن بادام زمینی مورد بررسی قرار گرفت. براساس یافته‌ها فرآیند برشته شدن در دوره نزولی اتفاق می‌افتد و انتقال رطوبت در مغز بادام زمینی به وسیله مدل نفوذ فیک توصیف شد. از طرفی وابستگی دمایی و توانی ضریب نفوذ با استفاده از رابطه آرنیوس و آرنیوس اصلاح شده توصیف شد. مدل دو جمله‌ای و مدل لگاریتمی به عنوان بهترین مدل برای برازش داده‌های آزمایشگاهی برشته شدن انتخاب شدند. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اذعان کرد که استفاده از سامانه ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز یک روش مقرون به صرفه از نظر مصرف انرژی به شمار می‌آید و با افزایش توان از میزان مصرف انرژی سامانه کاسته شد، بنابراین به کارگیری توان‌های بالا می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های ترکیبی شود.

منابع

Ajibola, O. O. (1989). Thin layer drying of melon seed. *Journal of Food Engineering*, 9(4), 305-320.

Akpinar, E. K. & Bicer, Y. (2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1367-1375.

Bhattacharya, S. & Prakash, M. (1997). Kinetics of roasting of split chickpea (*Cicer*

changes in sesame seeds during the conventional roasting. *Journal of Food Engineering*, 75, 167-177.

Karathanos, V. T. & Belessiotis, V. G. (1999). Application of a thin layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74, 355-361

Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. & Tabil, L. G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78, 98-108.

Kumar, C. M., Rao, A. G. & Singh, S. A. (2009). Effect of infrared heating on the formation of sesamol and quality of defatted flours from *Sesamum indicum* L. *Journal of Food Science*, 74, 105-111.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H. & Buckle, K. A. (1996). Thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75-97.

Mayer, K. P. (1985). Infrared roasting of nuts, particularly hazelnuts. *Confectionary Production*, 51, 313-314.

Midilli, A., Kucuk, H. & Yapar, Z. A. (2002). New model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503-1513.

Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H. & Amirnejat, H. (2011). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy* 36, 6433-6441.

Nachaisin, M., Jamradloedluk, J. & Niamnuy, C. (2016). Application of combined far-infrared radiation and air convection for drying of instant germinated brown rice. *Journal Food Process engineering*, 39 (3), 306-18.

Ozdemir, M. & Devres, O. Y. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233.

Ozdemir, M. & Devres, O. Y. (2000). Analysis of color development during roasting of hazelnuts using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 45, 17-24.

Palipane, K. B. & Driscoll, R. H. (1994). Thin-layer drying behavior of Macadamia in-shell nuts and kernels. *Journal of Food Engineering*, 23, 129-144.

Parry, J. L. (1985). Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32, 1-29.

Parti, M. (1993). Selection of mathematical models for drying grain in thin layers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54, 339-352.

Perren, R. & Escher, F. (1996). *Rosttechnologie von Haselnüssen, Teil III: Optimierung des rostverfahrens flour nusse. Zucker und Susswaren Wirthschaft*, 49, 142-145.

Pittia, P., Rosa, M. D. & Lericci, C. R. (2001). Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 34, 168-171.

Rizvi, S. S. H. (2005). *Thermodynamic properties of foods in dehydration. Third Edition. Taylor and Francis Publisher.*

Saklar, S., Katnas, S. & Urgan, S. (2001). Determination of optimum hazelnut roasting conditions. *International Journal of Food Science and Technology*, 36, 271-281.

Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J. & Rosello, C. (1996). Drying models for green peas. *Food Chemistry*, 55, 121-128.

Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S. & Soponronnarit, S. (2008). Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering*, 86, 573-583.

Vollmann, J. & Rajcan, I. (2010). *Oil Crops. Springer. London*

Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F. & Zhao, G. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research international*, 40, 36-46.

Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.