

مدلسازی فرآیند سرخ کردن سیب‌زمینی جهت تعیین ضرایب انتقال جرم

وحید محمدپور کاریزکی^{۱*} - محمد تقی حامد موسویان^۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۱۱

چکیده

سرخ کردن یکی از مهم‌ترین عملیات واحدهای مورد استفاده در صنایع غذایی بوده که به شکل‌های مختلفی از جمله سرخ کردن تحت خلاء، تحت فشار، با استفاده از امواج مایکروویو و سرخ کردن عمیق قابل اجراء است. به طور کلی با خروج آب و کاهش رطوبت ماده غذایی و نیز ورود روغن از طریق نفوذ و جذب؛ محصول نهایی که پس از فرآیند سرخ کردن تولید می‌شود؛ رنگ، بافت، طعم و کیفیت مطلوبی را به دنبال خواهد داشت. یکی از مهمترین نکات در طراحی، مدلسازی و بهینه‌سازی فرآیندهای سرخ کردن؛ تعیین صحیح پارامترهای انتقال جرم (ضریب نفوذ موثر؛ عدد بدون بعد بایوت جرمی و ضریب انتقال جرم) است. در این پژوهش با به کارگیری سیستم استوانه‌ای، روشی برای تعیین پارامترهای انتقال جرم سیب‌زمینی استوانه‌ای شکل طی فرآیند سرخ کردن ارائه شده است. بدین منظور و جهت انجام آزمایشات مختلف، یک سرخ کن آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند سرخ کردن و انجام آزمایشات در سه سطح دمایی ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ °C صورت پذیرفت. از برازش داده‌های تجربی حاصله با مدل ریاضی به دست آمده در مختصات استوانه‌ای، ضریب نفوذ موثر (D_{AB})، عدد بدون بعد بایوت (Bi) و ضریب انتقال جرم (K_C) به ترتیب در محدوده $9-10 \times 10^{-6} - 1.93 \times 10^{-6}$ (m²/s)، $7/34-9/35$ و $1/67-2/74 \times 10^{-5}$ (m/s) تعیین گردید که توافق قابل قبولی با یافته‌های به دست آمده توسط سایر محققین مشاهده می‌گردد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش دما، ضریب نفوذ موثر و ضریب انتقال جرم افزایش و عدد بدون بعد بایوت جرمی کاهش می‌یابد. معادله آرنیوس نیز به عنوان یکی از بهترین روابطی که ضریب نفوذ موثر را به صورت تابعی از دما پیشگویی می‌کند، ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: سرخ کردن، ضرایب انتقال جرم، سیب‌زمینی

مقدمه

۲۰۰-۱۵۰ °C انجام می‌شود (Farkas, Singh *et al.*, 1996). به طور کلی با خروج آب و کاهش رطوبت ماده غذایی و نیز ورود روغن از طریق نفوذ و جذب؛ محصول نهایی که پس از فرآیند سرخ کردن تولید می‌شود؛ رنگ، بافت، طعم و کیفیت مطلوبی را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر خواص ظاهری، چشایی و ارگانولپتیک منحصر به فردی که محصولات سرخ شده را مورد پسند مصرف‌کنندگان قرار داده است؛ سرعت بالا، سادگی و هزینه نسبتاً پایین فرآیند در مقیاس صنعتی؛ سرخ کردن را به عنوان یکی از پر کاربردترین فرآیندها در صنایع غذایی مطرح کرده است (Mestdagh, De Wilde *et al.*, 2008). به گفته پارکاش و گرتز؛ تغییرات فیزیکی و شیمیایی مختلف در اثر واکنش‌های گوناگونی چون ژلاتینه شدن نشاسته، واکنش میلارد، دناتوره شدن پروتئین‌ها و نیز از دست رفتن رطوبت رخ می‌دهد. از نتایج مثبت این واکنش‌ها نیز می‌توان به ایجاد طعمی مطلوب در ماده غذایی اشاره کرد (Alvis, Vélez *et al.*, 2009). البته کیفیت نهایی محصول سرخ شده تابع پارامترهای مختلفی چون دمای سرخ کردن، نوع روغن، نوع ماده غذایی و ضخامت قطعات غذا، مدت

سیب‌زمینی به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین محصولات کشاورزی در سرتاسر دنیا شناخته می‌شود. از این ماده غذایی که تولید آن فقط در ایران به بیش از ۴۵۰۰۰۰۰ تن در سال می‌رسد (FAO 2007)، محصولات و فرآورده‌های غذایی مختلفی چون چیپس، کنسرو، پوره و پودر سیب‌زمینی تولید می‌گردد. یکی از پر کاربردترین روش‌های تولید فرآورده‌های سیب‌زمینی سرخ کردن می‌باشد. سرخ کردن عمیق^۳ یا سرخ کردن به روش غوطه‌وری^۴ به عنوان یکی از قدیمی‌ترین فرآیندهای پخت^۵ شناخته می‌شود که با فرو بردن ماده غذایی در روغن یا چربی خوراکی داغ صورت می‌گیرد. معمولاً فرآیند سرخ کردن در دماهایی بالاتر از نقطه جوش آب یعنی در حدود

۱ و ۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی و دانشیار گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(*- نویسنده مسئول: Email: Mohammadpour_vahid@yahoo.com)

3- Deep Fat Frying
4- Immersion Frying
5- Cooking

ساخته است (Farinu and Baik 2008). لازمه طراحی، بهینه سازی و کنترل صحیح و دقیق فرآیندهای انتقال جرم طی عملیات سرخ کردن، آگاهی داشتن از پارامترهای انتقال جرم (ضریب نفوذ موثر، ضریب انتقال جرم و عدد بدون بعد بایوت جرمی) می باشد (Yildiz, Koray Palazoglu *et al.*, 2007). بیک و آدومی نیز تعیین پارامترهای انتقال جرم جهت تجزیه و تحلیل دینامیک فرآیند و تخمین شدت‌های انتقال جرم را ضروری دانسته‌اند (Farinu and Baik 2008).

اگر چه تا کنون در مورد ضریب انتقال جرم تحقیقاتی صورت گرفته است (Yildiz, Koray Palazoglu *et al.* 2007; Farid and Kizilel 2009)، ولیکن در قیاس با فعالیت‌های صورت گرفته مرتبط با انتقال حرارت (Baumann and Escher 1995; Hubbard and Farkas 2000; Seruga; Budzaki and Seruga 2005; Farkas 2000; Sosa-Morales, Orzuna-Espíritu; and Budzaki 2005; Yildiz, Koray; Farinu and Baik 2007; *et al.* 2006; Alvis, Vélez *et al.*, 2009; Palazoglu *et al.*, 2007; Farid and Kizilel 2009)، خلاء نسبتاً زیادی در این زمینه دیده می‌شود، ضمن اینکه اکثر تحقیقات صورت گرفته چه در انتقال حرارت و چه در انتقال جرم با در نظر گرفتن سیستم هندسی ساده‌ای در مختصات کارتزین به انجام رسیده است. در صورتی که در عمل شکل کروی یا استوانه‌ای برخی از مواد غذایی (همچون زولبیا، بامیه، سوسیس، دونات، پیراشکی و انواع خمیرها و محصولات گلوله‌ای و لوله‌ای) امکان و اجازه استفاده از سیستم ساده شده‌ای در مختصات کارتزین را نخواهد داد. هدف از انجام این پژوهش، توسعه مدل ریاضی جدیدی در مختصات استوانه‌ای جهت تعیین ضرایب انتقال جرم طی فرآیند سرخ کردن سیبزمینی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

الف) آماده سازی نمونه

جهت آماده سازی نمونه‌ها، سیبزمینی مورد نیاز از یک بازار محلی تهیه گردید و در اتاقی تاریک و خنک پوست گیری و شسته شده (Zúñiga, Moyano *et al.* 2008) و سپس قطعات استوانه‌ای شکل به قطر ۱ cm (شعاع ۵ mm) و با طول‌های متفاوت به صورت دستی و با استفاده از قالب و چاقو از آن برش داده شد. نمونه‌های تهیه شده جهت مدلسازی فرآیند سرخ کردن؛ به صورتی که در بخش ج) توضیح داده شده، مورد استفاده قرار گرفت. در تمام آزمایشات تعیین رطوبت اولیه و نیز رطوبت در حین سرخ کردن با قرار دادن نمونه‌ها در آون (دمای $103 \pm 2^\circ\text{C}$) تا رسیدن به یک وزن ثابت صورت پذیرفت (AOAC 1995). درصد رطوبت $82 \pm 1\%$ به عنوان میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها، ثبت گردیده است. در این مطالعه،

زمان سرخ کردن و حتی روش سرخ کردن (سرخ کردن سطحی^۱ و یا سرخ کردن عمیق) می‌باشد (Alvis, Vélez *et al.*; Fellow 1990; *al.*, 2009).

تا کنون فرآیند سرخ کردن عمیق بر روی محصولات غذایی مختلفی چون بارهنگ (Totte, Diaz *et al.*, 1996)، توردیلا (Chen and Moreira 1997)، مواد نشاسته‌ای (Mallikarjunan, Chinnan *et al.*, 1997) (Rimac-Brnčić, Lelas; Moyano, RíoSeco *et al.* 2002) (Debnath, Rastogi *et al.*, 2009; *et al.* 2004) (De Grandi; Vitrac, Dufour *et al.*, 2002) (Baik and Castro Freitas, Berbari *et al.*, 2009) (Baik and Mittal 2005; Mittal 2003) (Debnath, Bhat *et al.*, 2003)، سیبزمینی شیرین (Farinu and Baik 2008; Farinu and Baik 2007) و ناگت جوجه (Ngadi, Wang *et al.*, 2009) به اجرا درآمده است. سرخ کردن عمیق گوشت شترمرغ (Amiryousefi, Mohebbi *et al.* 2011) (Debnath, Rastogi *et al.*, 2011) و ناگت میگو (Dehghan Nasiri, Mohebbi *et al.*, 2011) از جدیدترین پژوهش‌های انجام شده توسط محققین می‌باشد.

در طی فرآیند سرخ کردن عمیق، به طور معمول سه نوع انتقال جرم صورت می‌گیرد: الف) انتقال رطوبت از مرکز ماده غذایی به سمت سطح خارجی، ب) انتقال و جذب روغن از سرخ کن به داخل ماده غذایی، ج) استخراج اجزای جامد^۲ مایع شده داخل ماده غذایی به داخل روغن داغ (Debnath, Rastogi *et al.*, 2009). یکی از نتایج انتقال جرم طی فرآیند سرخ کردن، تشکیل پوسته‌ای ترد و شکننده با رنگ طلایی یا قهوه‌ای در سطح ماده غذایی است که با تنظیم دما، اندازه قطعه و سایر پارامترها می‌توان پوسته‌ای خوشایند مصرف کننده را تولید نمود.

اگرچه در فرآیندهای حرارتی دیگری چون خشک کردن^۳، جوشاندن^۴، برشته کردن^۵ و نیز پختن^۶ انتقال جرم دیده می‌شود، ولیکن بیچیدگی مساله در سرخ کردن نسبت به سایر فرآیندها بیشتر است، چراکه علاوه بر انتقال جرم و حرارت همزمان، تغییرات فیزیکی و شیمیایی متعددی که در اثر انجام واکنش‌های مختلف در روغن داغ و نیز ماده غذایی رخ می‌دهد؛ مطالعه و آنالیز این فرآیند را دشوار تر

- 1- Pan-Frying
- 2- Leaching
- 3- Drying
- 4- Boiling
- 5- Roasting
- 6- Baking

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) \right] \quad (2)$$

برای حل رابطه ۲ روش‌های عددی و تحلیلی مختلفی ارائه شده است (Kreyszig's 2005) که در این پژوهش از روش تحلیلی و دقیق جداسازی متغیرها^۱ برای یافتن پاسخ نهایی استفاده می‌گردد. شرایط مرزی و اولیه برای حل رابطه ۲ به صورت زیر است:

$$I.C \rightarrow C_A(r, 0) = C_i \quad (3)$$

$$B.C(1) \rightarrow C_A(0, t) = \text{finite} \quad (4)$$

$$B.C(2) \rightarrow -D_{AB} \frac{\partial C_A(r_0, t)}{\partial r} = k_c (C_A(r_0, t) - C_\infty) \quad (5)$$

همان‌طور که در معادله ۲ نیز نشان داده شده است، غلظت رطوبت در استوانه به صورت تابعی از مکان و زمان در نظر گرفته شده که با انتگرال‌گیری در کل حجم استوانه، می‌توان غلظت متوسطی برای رطوبت که فقط تابعی از زمان باشد، ارائه کرد. غلظت متوسط $\bar{C}(t)$ از رابطه ۶ تعیین می‌گردد که نتیجه ساده شده نهایی را می‌توان در رابطه ۷ مشاهده کرد:

$$\bar{C}(t) = \frac{1}{V} \int_0^V C_A(r, t) dV \quad (6)$$

$$\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty} = \psi e^{-D_{AB} \lambda_1^2 t} \quad (7)$$

که در رابطه فوق؛ مقصود از ψ ، رابطه ۸ می‌باشد.

$$\psi = \frac{4}{(\lambda_1 r_0)^2 \left[1 + \left(\frac{J_0(\lambda_1 r_0)}{J_1(\lambda_1 r_0)} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

اگر از طرفین رابطه ۷ لگاریتم گرفته شود، یک رابطه خطی مانند $Y = aX + b$ حاصل می‌شود. مطابق معادله ۹، از رسم مقادیر $\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty}\right)$ بر حسب t ؛ خطی با شیب $-D_{AB} \lambda_1^2$ و عرض از مبدا $\ln \psi$ خواهیم داشت.

$$\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty}\right) = \ln \psi - D_{AB} \lambda_1^2 t \quad (9)$$

داده‌های حاصل از آزمایش در سه دمای مختلف 150°C ، 170°C و 190°C روی نموداری با محورهای عمودی $\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty}\right)$ و افقی t مشخص شده و سپس با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی^۲ در نرم‌افزار مطلب^۳؛ بهترین خط راست گذرا از هر سری از داده‌ها تعیین و شیب و عرض از مبدا خطوط مشخص گردید.

آزمایشات سرخ‌کردن سیب‌زمینی در روغن مایع آفتابگردان محصول شرکت شادگل ایران انجام گرفته است.

ب) دستگاه سرخ‌کن و نحوه انجام آزمایشات

انجام آزمایشات سرخ‌کردن برای هر نمونه در یک دستگاه سرخ‌کن ساخت شرکت Techno (مدل Te-500) و در سه سطح دمایی 150°C ، 170°C و 190°C صورت پذیرفت. در هر یک از سه سطح دمایی مذکور، نمونه‌های مورد آزمایش در فواصل زمانی 20 ثانیه‌ای از آغاز تا انتهای فرآیند سرخ‌کردن از دستگاه خارج شده و بلافاصله روغن سطحی آن توسط دستمال کاغذی جذب (Yildiz, Koray) (Palazoglu et al., 2007) و جهت اندازه‌گیری محتوی رطوبت به آن انتقال داده شد. اندازه‌گیری میزان رطوبت نمونه‌ها همچون تعیین رطوبت اولیه سیب‌زمینی در دمای $103 \pm 2^\circ\text{C}$ تا رسیدن به یک وزن ثابت صورت پذیرفت (AOAC 1995). داده‌های آزمایشگاهی محتوی رطوبت سیب‌زمینی بر حسب زمان که از مجموعه آزمایشات فوق به دست آمد، جهت تعیین پارامترهای انتقال جرم ضمن برازش روی معادله ریاضی که در بخش بعد ارائه می‌شود، مورد استفاده قرار گرفت.

ج) توسعه مدل ریاضی

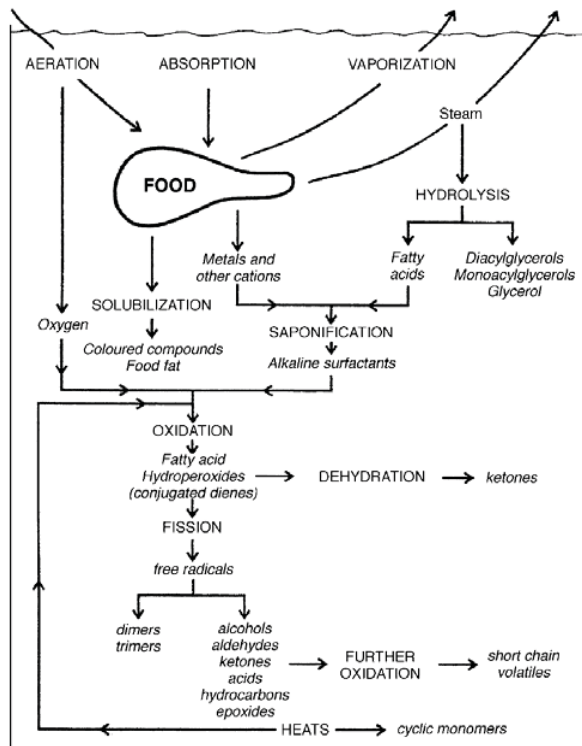
برای رسیدن به مدل ریاضی در مختصات استوانه‌ای که فرآیند سرخ‌کردن سیب‌زمینی را پوشش دهد، از معادله پیوستگی جزئی استفاده شده است (Bird, ; Treybal 1980; Crank 1975) (Stewart et al., 2002). در این معادله که در رابطه ۱ قابل مشاهده است، منظور از جزء A همان رطوبت یا آب موجود در ماده غذایی می‌باشد.

$$\left(\frac{\partial C_A}{\partial t} + u_r \frac{\partial C_A}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial C_A}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) = D_{AB} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C_A}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] + R_A$$

معمولاً طی فرآیند سرخ‌کردن واکنش‌های پیچیده و متعددی انجام می‌شود که تجزیه و تحلیل این فرآیند را دشوار می‌سازد. در شکل ۱ به صورت شماتیک، مجموعه‌ای از واکنش‌های حاصله در طی فرآیند سرخ‌کردن نشان داده شده است.

اما از طرف دیگر، ترم واکنش در رابطه ۱ به معنای تولید و یا مصرف آب داخل ماده غذایی است که این واکنش در مقایسه با سایر واکنش‌ها ناچیز و قابل صرف نظر شمرده می‌شود. بنابراین می‌توان ترم R_A در رابطه ۱ را حذف کرد. ترم‌های سرعتی در سمت چپ رابطه ۱ (u_r, u_θ, u_z) نیز به دلیل ساکن بودن سیستم و ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، صفر در نظر گرفته می‌شوند. به منظور ساده‌تر شدن رابطه ۱ جهت ارائه یک حل تحلیلی برای آن؛ از تغییرات غلظت در جهات θ و z نیز صرف نظر کرده و رطوبت فقط تابعی از زمان و جهت r در نظر گرفته می‌شود. با این فرض رابطه ۲ قابل حصول است.

1- Separation of Variables
2- Curve Fitting Toolbox(cftool)
3- MATLAB Software



شکل ۱- تبخیر، جذب روغن و واکنش‌های پیچیده طی فرآیند سرخ کردن (Russell 2001)

از شیب و عرض از مبداء آن مطابق معادله ۹، λ_1 و D_{AB} به دست آید. این داده‌های آزمایشی که نشانگر محتوی رطوبت بر حسب زمان طی فرآیند سرخ کردن سیب زمینی استوانه‌ای شکل در سه سطح دمای 150°C ، 170°C و 190°C می‌باشد در شکل ۲ رسم شده است. از مقایسه شیب خطوط راست رسم شده در شکل ۲ می‌توان دریافت که شدت از دست رفتن آب در دماهای بالاتر، بیشتر می‌باشد. البته شیب داده‌های به دست آمده در لحظات ابتدایی (۶۰ ثانیه نخست) نسبت به شیب داده‌ها در دقیقه دوم به بعد بیشتر بوده که این مساله به دلیل تبخیر ناگهانی و سریع آب آزاد سطحی^۲ در سیب زمینی می‌باشد.

در واقع تعیین پارامترهای انتقال جرم با استفاده از بخش خطی داده‌های رسم شده (یعنی ثانیه ۶۰ به بعد) صورت گرفته است. مطابق داده‌های ارائه شده در جدول ۱، ضریب نفوذ موثر و ضریب انتقال جرم با افزایش دمای سرخ کردن، افزایش و عدد بدون بعد بایوت کاهش یافته است.

در ادامه می‌توان از برازش منحنی‌های مختلف بر داده‌های آزمایشی به دست آمده، بهترین رابطه‌ای که نشانگر تغییرات عدد بایوت، ضریب انتقال جرم و ضریب نفوذ موثر بر حسب دما باشد را تعیین کرد که بهترین معادلات حاصله با استفاده از برازش منحنی به

با مشخص شدن عرض از مبداء یعنی $\ln \psi$ ، طرف سمت چپ معادله ۸ یعنی ψ معلوم شده و تنها مجهول این معادله که λ_1 می‌باشد از طریق روش تکرار^۱ تعیین گردید. با تعیین مقدار λ_1 و نیز مشخص بودن مقدار $D_{AB} \lambda_1^2 -$ به عنوان شیب معادله ۹، مقدار مجهول D_{AB} نیز به دست آمد.

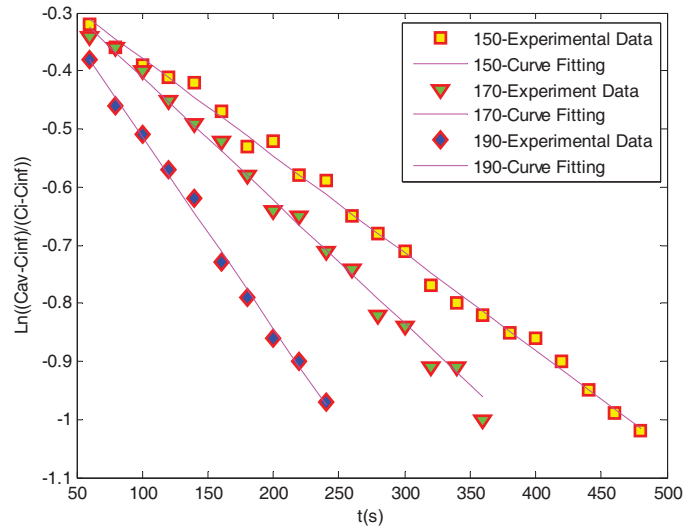
حال می‌توان از معادله مشخصه استوانه (رابطه ۱۰)، تنها مجهول این معادله که ضریب انتقال جرم (k_C) می‌باشد را به سادگی محاسبه کرد:

$$K_C = \frac{D_{AB} \lambda_1 J_1(\lambda r_0)}{J_0(\lambda r_0)} \quad (10)$$

نتایج و بحث

همان‌طور که در قسمت ج) (توسعه مدل ریاضی)، نیز توضیح داده شد، جهت تعیین ضریب نفوذ موثر باید بر داده‌های داده‌های غلظت بدون بعد $\ln\left(\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty}\right)$ بر حسب t خط راستی برازش کرد تا

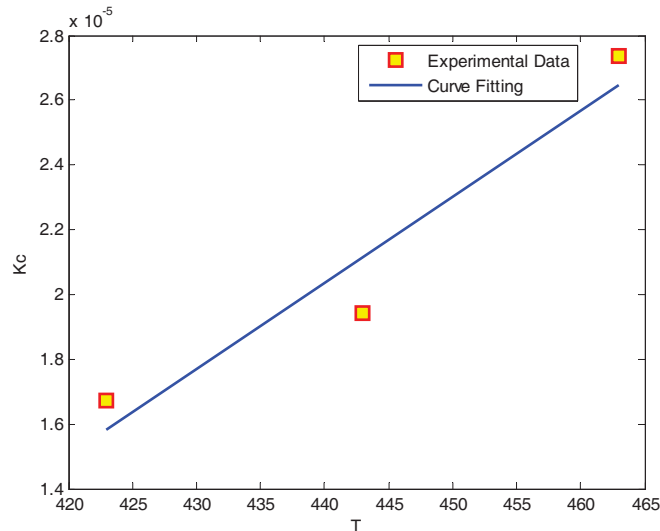
کمک نرم افزار مطلب به دست آمده و در جدول ۲ ارائه شده است. از بهترین روابط خواهد بود (شکل ۳). همان طور که در جدول ۲ نیز قابل مشاهده است؛ در مورد ضریب انتقال جرم، معادله خط راست $T = 9/682 \times 10^{-5} K_c - 2/663 \times 10^{-7}$ یکی



شکل ۲- رطوبت بدون بعد بر حسب زمان در طی فرآیند سرخ کردن سیب زمینی

جدول ۱- ضریب نفوذ موثر؛ ضریب انتقال جرم و عدد بدون بعد بایوت طی فرآیند سرخ کردن

شماره آزمایش	دمای سرخ کردن $T(^{\circ}C)$	ضریب نفوذ موثر $D_{AB}(m^2/s)$	ضریب انتقال جرم $K_C(m/s)$	عدد بدون بعد بایوت $Bi = \frac{K_C R}{D_{AB}}$
۱	۱۵۰	$8/9392 \times 10^{-5}$	$1/6707 \times 10^{-5}$	۹/۳۴۴۸
۲	۱۷۰	$11/5790 \times 10^{-5}$	$1/9409 \times 10^{-5}$	۸/۳۸۱۲
۳	۱۹۰	$18/6220 \times 10^{-5}$	$2/7360 \times 10^{-5}$	۷/۳۴۶۱



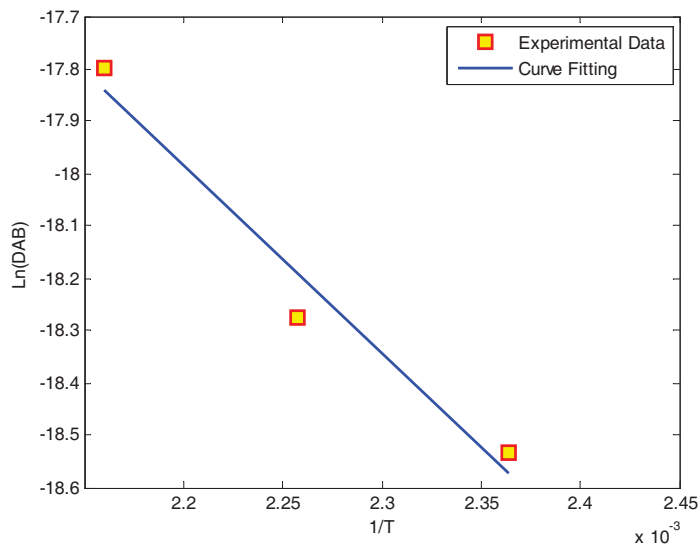
شکل ۳- تابعیت ضریب انتقال جرم نسبت به دما

جدول ۲- توابع برازش شده بر ضریب نفوذ موثر؛ ضریب انتقال جرم و عدد بدون بعد بایوت طی فرآیند سرخ کردن به همراه داده‌های آماری به دست آمده

ردیف	نوع معادله مورد برازش	پارامتر بدست آمده از آزمایشات		
		ضریب نفوذ موثر	ضریب انتقال جرم	عدد بدون بعد بایوت
۱	معادله خط راست ($y = aT + b$)	$D_{AB} = 2/421 \times 10^{-10} T - 9/419 \times 10^{-8}$ SSE=3/231 × 10 ⁻⁸ R-Square=0/9355	$K_C = 2/663 \times 10^{-7} T - 9/682 \times 10^{-8}$ SSE=4/592 × 10 ⁻¹² R-Square=0/9251	$Bi = -0/499T + 30/49$ SSE=0/00852 R-Square=0/9996
۲	تابع نمایی ($y = ae^{bT}$)	$D_{AB} = 4/22 \times 10^{-11} e^{-0/1294 T}$ SSE=6/401 × 10 ⁻¹⁸ R-Square=0/8723	$K_C = 7/667 \times 10^{-7} e^{-0/249 T}$ SSE=1/304 × 10 ⁻¹¹ R-Square=0/7873	$Bi = 117/e^{-0/057 T}$ SSE=0/00606 R-Square=0/997
۳	معادله درجه دوم ($y = aT^2 + bT + c$) $y = D_{AB}, K_C, Bi$	$a=5/504 \times 10^{-12}$ $b=-4/624 \times 10^{-9}$ $c=9/845 \times 10^{-7}$ SSE=9/517 × 10 ⁻²³ R-Square=1	$a=6/561 \times 10^{-9}$ $b=-5/547 \times 10^{-6}$ $c=0/01189$ SSE=2/037 × 10 ⁻²⁶ R-Square=1	$a=-1/927 \times 10^{-8}$ $b=0/02922$ $c=12/98$ SSE=1/204 × 10 ⁻²⁹ R-Square=1

جرم به عنوان تابعیت ضریب نفوذ موثر ارائه می‌شود، رابطه آرنیوس می‌باشد (معادله ۱۱).

در مورد ضریب نفوذ موثر، اگر چه با توجه به داده‌های آماری رابطه خطی $D_{AB} = 2/421 \times 10^{-10} T - 9/419 \times 10^{-8}$ نیز قابل قبول است ولیکن یکی از متداول‌ترین معادلاتی که در اکثر فرآیندهای انتقال



شکل ۴- تابعیت ضریب نفوذ موثر نسبت به دما

انجام شده توسط دیگر محققین می‌باشد (ده بوره و همکاران، ۱۳۸۸؛ محمدپور و همکاران، ۱۳۸۶).

نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی برای تعیین ضریب نفوذ و ضریب انتقال جرم، طی فرآیند سرخ کردن سیب‌زمینی و بر مبنای متوسط محتوی رطوبت نمونه‌ها ارائه گردید. مهمترین نتایج حاصله از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- ۱- ضریب انتقال جرم و ضریب نفوذ موثر انتقال جرم نسبت به دما طی فرآیند سرخ کردن سیب‌زمینی افزایش می‌یابد.
- ۲- معادله درجه دوم، درجه اول و تابع نمایی به ترتیب بهترین پیشگویی را چه در مورد ضریب انتقال جرم و چه ضریب نفوذ موثر انجام داده، ضمن اینکه استفاده از رابطه آرنیوس برای ضریب نفوذ موثر نیز قابل قبول خواهد بود.
- ۳- عدد بدون بعد بایوت جرمی با افزایش دما کاهش یافته، ضمن اینکه تابعیت عدد بایوت کاملاً خطی است.
- ۴- از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی در سه دمای سرخ کردن 150°C ، 170°C و 190°C می‌توان دریافت که شدت تبخیر و از دست رفتن آب در دماهای بالاتر، بیشتر بوده، و نیز زمان رسیدن به کیفیت یکسان برای محصول سرخ شده در دماهای بالاتر، کاهش می‌یابد.
- ۵- مقایسه انرژی فعالیت به دست آمده از این پژوهش با دیگر مطالعات انجام شده، صحت مدل‌سازی استوانه ای را تأیید می‌کند.

$$D_{AB} = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (11)$$

برای تعیین بهترین مقادیر انرژی فعالیت (E_a) و ضریب (D_0) از طرفین رابطه ۱۱ لگاریتم گرفته می‌شود.

$$\ln(D_{AB}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{T} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (12)$$

از رسم داده‌های $\ln(D_{AB})$ بر حسب $\frac{1}{T}$ می‌توان بهترین عرض از مبدا ($\ln(D_0)$) و شیب ($\frac{E_a}{R}$) و متعاقباً بهترین مقادیر E_a و D_0 را تعیین کرد (شکل ۴).

با استفاده از برازش منحنی به کمک نرم‌افزار مطلب، معادله $\ln(D_{AB}) = -3575\left(\frac{1}{T}\right) - 10.12$ جهت پیشگویی ضریب نفوذ موثر به صورت تابعی از دما تعیین گردید، که رابطه فوق را می‌توان به شکل معادله آرنیوس و در رابطه ۱۳ نیز مشاهده کرد:

$$D_{AB} = 4/0.266 \times 10^{-5} e^{-3575/T} \quad (13)$$

انرژی فعالیت فرآیند سرخ کردن سیب‌زمینی از رابطه ۱۳ برابر با $\frac{KJ}{mol}$ ۲۹/۷۲۲۵ به دست خواهد آمد که مقایسه این مقدار با نتایج دیگر محققین (Yildiz, ; McMinn and Magee 1996; Koray Palazoglu et al., 2007) در مورد خشک کردن سیب‌زمینی استوانه‌ای و سرخ کردن سیب‌زمینی مکعبی شکل، حاکی از صحت انجام مدل‌سازی استوانه ای دارد. ضرایب نفوذ به دست آمده در این مطالعه، در دامنه مقادیر گزارش شده برای سایر پژوهش‌های

منابع

- ده بوره، ر. و اسماعیلی، م.، ۱۳۸۸، تاثیر فرآیند خشک کردن نهایی با مایکروویو و هوای داغ بر پارامترهای خشک کردن انگور خشک شده، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، (۲)، ۱۲۲-۱۰۸.
- محمدپور، و.، حامد موسویان، م.ت. و اعتمادی، الف.، ۱۳۸۶، تعیین ضریب نفوذ موثر و انرژی فعالیت پسته طی فرآیند خشک کردن بستر سیال، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، (۲)، ۱۲-۱.
- Alvis, A., C. Vélez, et al., 2009, Heat transfer coefficient during deep-fat frying. Food Control 20(4): 321-325.
- Amiryousefi, M. R., Mohebbi, M. et al., 2011, An empowered adaptive neuro-fuzzy inference system using self-organizing map clustering to predict mass transfer kinetics in deep-fat frying of ostrich meat plates. Computers and Electronics in Agriculture 76(1): 89-95.
- AOAC, 1995, Official Methods of Analysis of AOAC International. AOAC International, USA.
- Baik, O.-D. and Mittal, G. S. 2005, Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. Food Research International 38(2): 183-191.
- Baik, O. D. and Mittal, G. S. 2003, Kinetics of tofu color changes during deep-fat frying. LWT - Food Science and Technology 36(1): 43-48.
- Baumann, B. and Escher, F. 1995, Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices --I. Rate of

- drying and oil uptake. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 28(4): 395-403.
- Bird, R. B., Stewart, et al. W. E., 2002, *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, Inc.
- Budzaki, S. and Seruga, B. 2005, Determination of convective heat transfer coefficient during frying of potato dough. *Journal of Food Engineering* 66(3): 307-314.
- Chen, Y. and Moreira, R. G. 1997, Modelling of a Batch Deep-Fat Frying Process for Tortilla Chips. *Food and Bioproducts Processing* 75(3): 181-190.
- rank, J., 1975, *The mathematics of diffusion*. London, UK: Oxford University Press.
- De Grandi Castro Freitas, D., S. A. G. Berbari, et al., 2009, Reducing fat uptake in cassava product during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering* 94(3-4): 390-394.
- Debnath, S., Bhat, K. K. et al., 2003, Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food. *LWT - Food Science and Technology* 36(1): 91-98.
- Debnath, S., Rastogi, N. K. et al., 2011, Effect of frying cycles on physical, chemical and heat transfer quality of rice bran oil during deep-fat frying of poori: An Indian traditional fried food. *Food and Bioproducts Processing*(0).
- Debnath, S., Rastogi, N. K. et al., 2009, Oil partitioning between surface and structure of deep-fat fried potato slices: A kinetic study. *LWT - Food Science and Technology* 42(6): 1054-1058.
- Dehghan Nasiri, F., Mohebbi, M. et al., 2011, Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Bioproducts Processing* 89(3): 241-247.
- FAO, 2007, *Statistical Database*. Available: <http://www.fao.org/>.
- Farid, M. and Kizilel, R. 2009, A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying and frying of food products. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48(1): 217-223.
- Farinu, A. and Baik, O.-D. 2007, Heat transfer coefficients during deep fat frying of sweetpotato: Effects of product size and oil temperature. *Food Research International* 40(8): 989-994.
- Farinu, A. and Baik, O.-D. 2008, Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweetpotato. *Journal of Food Engineering* 89(2): 187-194.
- Farkas, B. E., Singh, R. P. et al., 1996, Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, model development. *Journal of Food Engineering* 29(2): 211-226.
- Fellow, P. J., 1990, *Food Processing Technology- Principles and Practice*. Ellis Horwood Ltd, New York.
- Hubbard, L. J. and Farkas, B. E. 2000, Influence of oil temperature on convective heat transfer during immersion frying. 24(2): 143-162.
- Hubbard, L. J. and Farkas, B. E. 2000, A method for determining the convective heat transfer coefficient during immersion frying. *Journal of Food Process Engineering* 22: 201-214.
- Kreyszig's, E., 2005, *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Mallikarjunan, P., Chinnan, M. S. et al., 1997, Edible Coatings for Deep-fat Frying of Starchy Products. *LWT - Food Science and Technology* 30(7): 709-714.
- McMinn, W. A. M. and Magee, T. R. A. 1996, Air drying kinetics of potato cylinders. *Drying Technology* 14(9): 2025-2040.
- Mestdagh, F., De Wilde, T. et al., 2008, Optimization of the blanching process to reduce acrylamide in fried potatoes. *LWT - Food Science and Technology* 41(9): 1648-1654.
- Moyano, P. C., Rioseco, V. K. et al., 2002, Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated french fries. *Journal of Food Engineering* 54(3): 249-255.
- Ngadi, M. O., Wang, Y. et al., 2009, Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *LWT - Food Science and Technology* 42(1): 438-440.
- Rimac-Brnčić, S., Lelas, V. et al., 2004, Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying. *Journal of Food Engineering* 64(2): 237-241.
- Rossell, J., 2001, *Frying: Improving Quality*. Woodhead Publishing Ltd.
- Seruga, B. and Budzaki, S. 2005, Determination of thermal conductivity and convective heat transfer coefficient during deep fat frying of krostula dough. *European Food Research and Technology* 221(3-4): 351-356.
- Sosa-Morales, M. E., Orzuna-Espiritu, R. et al., 2006, Mass, thermal and quality aspects of deep-fat frying of pork meat. *Journal of Food Engineering* 77(3): 731-738.
- Totte, A., and Diaz, et al. A., 1996, Deep-Fat Frying of Plantain (*Musa paradisiaca* L.). II: Experimental Study of Solid/Liquid Phase Contacting Systems. *LWT - Food Science and Technology* 29(7): 599-605.
- Treybal, R. E., 1980, *Mass Transfer Operations*. McGraw-Hill Companies.

- Vitrac, O., Dufour, D. et al., 2002, Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering* 53(2): 161-176.
- Yildiz, A., Koray T. Palazoglu, et al., 2007, Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering* 79(1): 11-17.
- Zúñiga, R. N., Moyano, P. C. et al., 2008, Enthalpy-entropy compensation for water loss of potato slices during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering* 88(1): 1-8.