

ارزیابی مدل‌های ریاضی در بیان تأثیر دما بر جذب روغن طی فرایند سرخ کردن

حسن صباغی*^۱، امان محمد ضیائی^۲، علیرضا صادقی ماهونک^۳، مهدی کاشانی نژاد^۴، حبیب‌اله میرزایی^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. استادیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. دانشیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۵. دانشیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۲/۹)

چکیده

جذب روغن طی فرایند سرخ کردن از مهمترین جنبه‌های کیفی محصول است. هدف این پژوهش بررسی تأثیر دما بر محتوای روغن محصول نهایی و استنباط آن توسط مدل‌های تجربی بود. بدین منظور خلال‌های سیب‌زمینی در اندازه مشخص پس از آنزیم‌بری در سرخ‌کن مجهز به کنترل‌کننده دما در سه دمای ۱۴۵، ۱۶۰، و ۱۷۵ °C به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، و ۲۴۰ ثانیه سرخ شدند. با ثبت تغییرات دمای سطحی و مرکزی طی فرایند با ترموکوپل و دستگاه ثبت داده، مراحل گوناگون آن از نظر زمانی تفکیک شد. روغن نمونه‌ها نیز با روش سوکسله استخراج و تغییرات آن با مدل‌های سینتیکی (مدل ۱ و مدل ۲) در نرم‌افزار MATLAB برازش شد. مدل‌ها با دو شاخص R^2 و RMSE و معادله آرنیوس با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد مقدار محتوای روغن تعادلی (O_{eq}) به‌دست‌آمده از برازش مدل‌ها با دما رابطه معکوس دارد که تأییدکننده کاهش جذب روغن با افزایش دمای سرخ کردن بود. با آنالیز آماری داده‌های تجربی، دمای بحرانی برای کاهش جذب روغن نیز ۱۶۰ °C به‌دست آمد. محدوده زمانی پیش از اتمام مرحله جوشش سطحی محصول، به‌منظور کمترین جذب روغن، حدود ۱۸۰-۱۶۰ ثانیه برآورد شد.

کلیدواژگان: جذب روغن، دما، سرخ کردن، مدل، MATLAB.

مقدمه

جوشش سطحی شامل تشکیل پوسته و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، مرحله نرخ کاهشی (Falling rate) شامل افزایش ضخامت پوسته، طولانی‌ترین مرحله و در نهایت مرحله نقطه پایان حباب (Bubble end point) است (Alvis *et al.*, 2009). این چهار مرحله می‌تواند به‌صورت دو فاز عدم جوشش (شامل حرارت‌دهی اولیه و نقطه پایان حباب) و فاز جوشش (شامل جوشش سطحی و مرحله نرخ کاهشی) بیان شود (Seruga & Budzaki, 2005). در مراحل متفاوت سرخ کردن، جذب روغن پدیده‌ای سطحی است و به مقدار آب جابه‌جاشده و میزان رطوبت از دست‌رفته محصول بستگی دارد (Ufheil & Escher, 1996).

از مهمترین مکانیسم‌های مؤثر در جذب روغن می‌توان به جایگزینی آب، اثر فاز سرد شدن (Cooling-phase)، و عوامل فعال در سطح اشاره کرد. اولین مکانیسم جذب روغن جایگزینی آب بیان شده است. در طی فرایند، رطوبت در داخل ماده غذایی به بخار تبدیل می‌شود و این امر شیب فشار مثبت ایجاد می‌کند. بخار آب از ماده غذایی خارج می‌شود و ایجاد خلل و فرج و فشار مؤثری می‌کند و در نتیجه روغن به داخل ماده غذایی نفوذ

مواد غذایی سرخ‌شده حاوی مقدار شایان توجهی روغن، در برخی موارد تا یک‌سوم وزن کل محصول هستند که این امر از نظر سلامتی می‌تواند برای مصرف‌کننده خطرناک باشد. در دهه‌های اخیر تلاش برای آشنایی هرچه بیشتر با چگونگی جذب روغن و کاهش آن در محصولات سرخ‌شده افزایش یافته است. فرایند سرخ کردن از رایج‌ترین عملیات واحد در صنایع غذایی است که در دنیا سالانه بیش از ۲۰ میلیون تن روغن سرخ‌کردنی را مصرف می‌کند (Gertz, 2004). سرخ کردن فرایند آب‌زدایی است که در روغنی با دمای بالا (حدود ۱۴۰ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد) انجام می‌گیرد اما با این حال، درجه حرارت داخل ماده غذایی از ۱۰۰ درجه سانتیگراد بالاتر نمی‌رود (Saguy *et al.*, 1998). این فرایند شامل چهار مرحله پیش‌حرارت‌دهی (Preheating) یا حرارت‌دهی اولیه در زمان‌های ابتدایی فرایند شامل انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و عدم تبخیر، مرحله

بنابراین برای جذب روغن کل، مجموع چربی نفوذ کرده به پوسته و کریستالیزاسیون چربی در سطح در نظر گرفته می‌شود (Mellema, 2003). عامل دیگر مؤثر در جذب روغن عوامل فعال در سطح هستند. با پیشرفت فرایند سرخ کردن، روغن تجزیه و از مخلوط خالصی از تری‌گلیسریدها، به مخلوطی از صدها ترکیب گوناگون تبدیل می‌شود. هرچقدر روغن در طی فرایند دچار آسیب بیشتری شود ترکیبات فعال در سطح بیشتری تشکیل می‌شود و ارتباط ماده غذایی و روغن افزایش می‌یابد و این امر موجب خشک شدن بیش از حد ماده غذایی و تیرگی محصول می‌شود (Dobarganes *et al.*, 2000). تشکیل سورفکتانت تماس بین غذا و روغن سرخ‌کردنی را افزایش می‌دهد و در نتیجه موجب جذب بیش از حد روغن می‌شود. بنابراین غلظت سورفکتانت بیشتر، موجب تولید محصولات مملو از روغن (-Oil soaked product) با سطح خارجی بیش از حد پخته، تیره‌رنگ و خشک، و سطح داخلی نپخته می‌گردد (Blumenthal, 2001).

عوامل متعددی روی جذب روغن در فشار اتمسفر مؤثرند که از مهمترین این عوامل کیفیت و ترکیب روغن، شکل محصول، دما و زمان سرخ کردن، محتوای رطوبت، تخلخل اولیه، و تیمارهای پیش و پس از فرایند را می‌توان نام برد. برای فهم بهتر جذب روغن طی فرایند سرخ کردن می‌توان آن را به صورت دو مرحله سرخ کردن و مرحله ایجاد فشار (Pressurization) بیان کرد. مرحله اول شامل تشکیل پوسته، جذب روغن، و اتفاقاتی است که حین سرخ کردن روی می‌دهد و مرحله دوم بعد از خروج محصول از بستر روغن آغاز می‌شود که به سرعت با افزایش فشار منفی (خلأ) در حفرات محصول روغن سطحی به داخل ماده غذایی، تا زمانی که فشار حفره‌های با فشار اتمسفر در حالت تعادل قرار گیرد، نفوذ می‌کند که اثر اسفنجی (Sponge effect) نام دارد (Troncoso & Pedreschi, 2009).

امروزه تجهیزات طراحی شده براساس این روش سرخ کردن با هدف دستیابی به محصولات سرخ شده با حداقل روغن موجودند. در روشی جدید به نام سرخ کردن با هوای داغ، با تماس مستقیم بین امولسیون حاصل از پخش قطرات روغن در هوای داغ در محفظه سرخ‌کن، محصول با سرعت ثابت از محفظه عبور می‌کند تا تماس یکنواختی بین دو فاز به وجود آید. محصول در این حالت آب‌زدایی و پوسته معمول محصولات سرخ شده در آن تشکیل می‌شود. میزان روغن مصرف شده در این روش به میزان معنی‌داری از روش معمول سرخ کردن عمیق کمتر است در نتیجه محصولی با حداقل محتوای روغن تولید می‌شود (Andres *et al.*, 2012).

می‌کند. به همین ترتیب بخش‌هایی از محصول که کاهش رطوبت در آن‌ها بیشتر است جذب روغن بیشتری نشان می‌دهند. برخی معتقدند که حجم کلی چربی جذب شده متعادل با حجم آب خارج شده از محصول است (تعادل جرم) به طور غیرمستقیم افزایش تبخیر موجب آسیب بیشتر به پوسته می‌شود و مشاهده شده است که تخلخل و جذب روغن به طور معکوس به محتوای رطوبت در مراحل گوناگون سرخ کردن بستگی دارند. با وجود این بخش عمده جذب روغن در مرحله سرد کردن است (Rice & Gamble, 1989). در واقع بیشترین جذب روغن به محصول در زمان برداشتن از روی سرخ‌کن، ناشی از کندانس شدن بخار و ایجاد شرایط خلأ در داخل محصول است (Gamble & Rice, 1987). البته جذب روغن از نظر ساختار بندی محصول می‌تواند مفید باشد، زیرا روغن جذب شده در حفرات ناشی از خروج آب، از طریق جلوگیری از انقباض و چروکیدگی و بسته شدن منافذ، تمامیت ساختاری محصول را حفظ و به خروج آب از محصول نیز کمک می‌کند (Moreira & Barrufet, 1998). ساختار متخلخل خلال سیب‌زمینی موجب جذب روغن می‌گردد که تخلخل در حین سرخ کردن افزایش می‌یابد ولی در مرحله سرد کردن با جذب روغن تخلخل محصول کاسته می‌شود (Ziaifar *et al.*, 2010).

با توجه به اینکه روغن فقط از محلی که آب تبخیر شده است می‌تواند نفوذ کند، بنابراین نفوذ روغن فقط در جایی که دمای آن به حد کافی زیاد است، مانند پوسته اتفاق می‌افتد که دمای آن بالاتر از نقطه جوش مایع موجود در ماده غذایی است. شواهد زیادی وجود دارد که روغن در هسته پخته شده به سختی نفوذ می‌کند و ساختار پوسته عامل عمده تعیین کننده در جذب روغن است که با پیشرفت فرایند سرخ کردن در سطح محصول گسترش می‌یابد (Bingol *et al.*, 2012). با استفاده از روش‌های گرماسنجی مشخص شده است که پوسته خلال سیب‌زمینی سرخ شده تقریباً شش برابر بخش داخلی آن حاوی روغن است. با روش میکرواسپکتروسکوپی مادون قرمز مشخص شده است که عمق نفوذ روغن تقریباً ۴۰۰-۳۰۰ میلی‌متر است که بسیار نزدیک به مرز تبخیر است (Pedreschi *et al.*, 2008) و در شکل ۱ نشان داده شده است. علاوه بر استدلال تعادل جرم، دلیل دیگر برای تجمع روغن در سطح حضور چربی جامد است زیرا روغن سرخ‌کردنی ممکن است شامل بخش چرب (اشباع) باشد که در اثر خنک‌سازی جامد می‌شود. اگر عامل انجماد چربی، موجب سخت‌تر شدن نشت چربی از ماده غذایی شود محتوای چربی محصول افزایش می‌یابد، یا اگر در منافذ پوسته به طور عمیق نفوذ کند موجب کاهش محتوای روغن محصول می‌گردد.

نمونه‌هایی که بلانچ و خشک شدند، طی سرخ کردن تحت خلأ تقلیل یافت.

Rosi *et al.* (2009) تناسب بین زاویه تماسی به‌عنوان شاخصی برای پدیده تجزیه روغن و جذب روغن خلال‌های سیب‌زمینی طی سرخ کردن را بررسی کردند. ارتباط معنی‌داری بین زاویه تماسی و جذب روغن در خلال سیب‌زمینی برای روغن آفتابگردان مشاهده شد که با افزایش زاویه تماسی جذب روغن آفتابگردان کاهش یافت.

Pedreschi & Moyano (2006) نیز جذب روغن طی سرخ کردن را به‌صورت مدل تابع کسری بیان کردند که در زمان‌های ابتدایی فرایند رفتار خطی نشان می‌داد. حداکثر روغن جذب شده با افزایش دمای فرایند کاهش یافت ولی مقایسه‌ای با مدل‌های دیگر صورت نگرفت.

در این پژوهش با توجه به گستردگی وسیع مصرف خلال‌های سیب‌زمینی به‌عنوان محصول فرایند سرخ کردن، سعی شده است تا جذب روغن طی سرخ کردن در مراحل گوناگون فرایند بررسی شود و مدل‌های بیان‌کننده جذب روغن با یکدیگر مقایسه شوند. افزون بر آن با توجه به اختلاف بیان محققان در ارتباط با تأثیرات فرآوری در دمای بالا روی جذب روغن این امر نیز بررسی گردد و همچنین زمان و دمای بحرانی جذب روغن برای کنترل فرایند از نظر این فاکتور کیفی به‌دست آید.

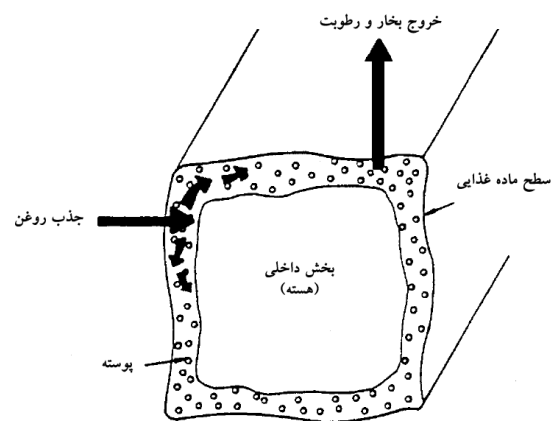
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی خلال‌های سیب‌زمینی

سیب‌زمینی واریته آگریا (*Agria*) پاییزه از بازار محلی در استان گلستان تهیه گردید و در دمای حدود 8°C و دور از نور برای جلوگیری از جوانه‌زنی نگهداری شد. پس از شستشو پوست‌گیری شد و به روش دستی به‌صورت خلال‌هایی در ابعاد $5 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ درآمد. سپس خلال‌ها شستشو داده شد تا نشاسته آزاد آن خارج شود. قبل از سرخ کردن عملیات آنزیم‌بری در آب با دمای 85°C به‌مدت $3/5$ دقیقه مطابق با روش (AOAC, 1995) انجام شد.

عملیات سرخ کردن

پس از وزن کردن خلال سیب‌زمینی و ثبت وزن اولیه آن، فرایند سرخ کردن روی خلال‌های سیب‌زمینی در یک سرخ‌کن (Deep fryer: Model BDZ-5A-1) حاوی دو لیتر روغن آفتابگردان و مجهز شده به کنترل‌کننده دما دارای ترموکوپل نوع K در دمای 145°C ، 160°C و 175°C به‌مدت 60 ، 120 ، 180 و 240 ثانیه انجام شد. پس از اتمام فرایند سرخ کردن نمونه حدود ۲ دقیقه



شکل ۱. تشکیل پوسته و جذب روغن در طی سرخ کردن خلال سیب‌زمینی

در مطالعات انجام‌گرفته در زمینه جذب روغن طی سرخ کردن اختلاف مشاهده می‌شود. جذب روغن خلال‌ها و چیپس‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده در دماهای پایین در مقایسه با دماهای بالاتر بیشتر است (Kita *et al.*, 2007). اگرچه این امر به عوامل دیگری مانند زمان فرایند و نوع روغن نیز ارتباط داده شده است و در برخی مطالعات نیز دماهای بالا موجب افزایش روغن محصول شده یا حتی تأثیری بر آن نداشته است (Dana & Saguy, 2006). علاوه بر انتشار، سیال می‌تواند با توجه به ساختار ماده توسط جریان کاپیلاری و شیب هیدرودینامیک نیز منتقل شود و احتمالاً این فاکتورها به‌طور کامل توسط ضریب مؤثر انتشار در انتقال جرم در نظر گرفته نمی‌شوند. به این دلایل و چون تئوری انتشار برخی جنبه‌های ساختاری مهم را برای محصول مانند چروکیدگی در نظر نمی‌گیرد، مدل‌سازی با کمک توابع تجربی می‌تواند بیان جامعی از پدیده‌شناسی جذب روغن طی سرخ کردن باشد (Troncoso & Pedreschi, 2009).

Krokida *et al.* (2000) کاهش آب و جذب روغن در خلال سیب‌زمینی را به‌عنوان تابعی از زمان به‌صورت نمایی افزایشی بررسی کردند. نتایج نشان داد که دمای روغن و ضخامت خلال‌های سیب‌زمینی تأثیر معنی‌داری روی جذب روغن و کاهش آب خلال‌های سیب‌زمینی داشتند. در حالی‌که استفاده از روغن هیدروژنه تأثیری بر پدیده‌های انتقال جرم در طی فرایند نداشت. کاهش آب و جذب روغن در دماهای بالا و نمونه‌هایی با ضخامت کوچکتر شدت بیشتری نشان داد.

Troncoso & Pedreschi (2009) مدل‌سازی کاهش آب و جذب روغن در طی سرخ کردن سیب‌زمینی در شرایط اتمسفری و خلأ را انجام دادند. جذب روغن در طی سرخ کردن تحت خلأ با افزایش زمان فرایند افزایش یافت و به میزان معنی‌داری تحت تأثیر نوع پیش‌تیمار محصول بود. جذب روغن در

$$\frac{O}{O_t} = (Kt)^{-1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

با قراردادن رابطه ۲ در رابطه ۱ به رابطه ۳ خواهیم رسید که در این پژوهش مدل اول نام دارد و توسط Moyano & Pedreschi (2006) بیان شد.

$$O = \frac{O_{eq} Kt}{1 + Kt} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه ۳ ثابت K نرخ ویژه جذب روغن برحسب عکس ثانیه است. برای زمان کوتاه این مدل رفتار خطی دارد ولی برای زمان‌های طولانی رفتار مستقل از زمان را نشان می‌دهد. در مدل دوم که به صورت رابطه ۴ است و Krokida et al. (2001) بیان کردند همین متغیرها در رابطه نمایشی افزایشی بیان شده‌اند. در هر دو مدل در زمان $t=0$ محتوای روغن محصول صفر است.

$$O = O_{eq} [1 - \exp(-Kt)] \quad (\text{رابطه ۴})$$

با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی (Curve fitting toolbox) در نرم‌افزار MATLAB و با تکنیک تکرار (Iteration) مدل‌های مورد نظر روی داده‌های تجربی جذب روغن با سطح اطمینان ۹۵ درصد برازش شد و پارامترهای مدل محاسبه گردید. دو پارامتر مربوط به مناسب بودن برازش به صورت ضریب همبستگی R^2 و ریشه میانگین مربعات خطا RMSE مطابق رابطه ۵ برای مقایسه دو مدل استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(O-P)^2}{n-p}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه ۵ O و P به ترتیب مقدار مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده است. n تعداد مشاهده و p تعداد پارامترهای مدل است.

بررسی ارتباط دما با محتوای نهایی روغن محصول

ارتباط بین میزان محتوای روغن تعادلی با دمای سرخ کردن با توجه به معادله آرنیوس مطابق رابطه‌های ۶ و ۷ به دست آمد.

$$O_{eq} = A_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$K = A_K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

در معادلات ۶ و ۷، E_a انرژی فعال‌سازی برحسب kJ/mol است و R ثابت جهانی گازهای ایده‌آل برابر با $8.314 \text{ kJ/kgmol} \cdot ^\circ\text{C}$ است. با خطی‌سازی رابطه‌های ۶ و ۷ به صورت معادلات لگاریتمی پایه‌نمایی، رابطه ۸ و رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$\ln O_{eq} = \ln A_o - \frac{E_a}{RT} \quad (\text{رابطه ۸})$$

روی کاغذ جاذب قرار گرفت تا روغن سطحی آن خارج شود. سپس خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده توزین و برای اندازه‌گیری رطوبت آن‌گذاری شد. به منظور فراهم‌سازی شرایط معین برای بررسی فرایند سرخ‌کردن، ترکیب شیمیایی و مقطع برش عرضی برای هر خلال سیب‌زمینی یکسان فرض شد.

ثابت تغییرات دمای محصول در حین سرخ‌کردن

به منظور جداسازی مراحل گوناگون سرخ‌کردن و تبخیر آب محصول از روش مستقیم مطالعه حرارتی با قراردادن ترموکوپل در داخل خلال سیب‌زمینی استفاده شد (Sahin et al., 1999). بدین منظور یک ترموکوپل نوع T در سطح و دیگری در مرکز محصول قرار گرفت. دمای مرکز محصول در مدت ۲۴۰ ثانیه با فاصله زمانی ۲ ثانیه با دستگاه ثبت‌داده "RS-Model TC-08 Pico technology (232)" و نرم‌افزار پیکولوگ (PicoLog) در کامپیوتر ثبت شد. با توجه به تغییرات دمای مرکزی محصول مراحل گوناگون فرایند از هم تفکیک شدند.

اندازه‌گیری رطوبت و روغن محصول

به منظور سنجش رطوبت، خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده طبق روش (AOAC, 1995) دستورالعمل مخصوص اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های چرب، در 103°C به مدت ۱۶ ساعت قرار گرفت. نمونه خشک حاصل از اندازه‌گیری رطوبت برای اندازه‌گیری روغن به روش سوکسله با خلال پترولیوم اثر به مدت ۶ ساعت طبق روش مدون (AOAC, 1995) استفاده شد. جرم رطوبت و روغن محصول برحسب ماده خشک فاقد روغن (g/g, db.-Oil) گزارش شد.

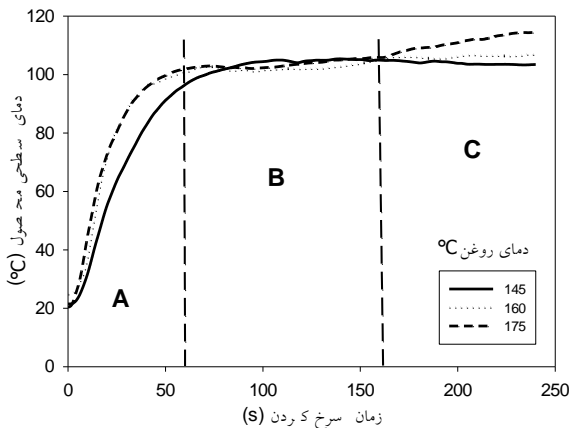
بررسی سینتیک جذب روغن

در این پژوهش دو مدل سینتیکی تجربی برای توصیف جذب روغن حین سرخ‌کردن با هم مقایسه شدند. در مدل اول محتوای روغن طی سرخ‌کردن می‌تواند به صورت رابطه ۱ باشد:

$$O_t = O_{eq} - O \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این جا O_t محتوای روغن در زمان t (برحسب ماده خشک فاقد روغن)، O_{eq} محتوای روغن در شرایط تعادلی یا حداکثر محتوای روغن در زمان بی‌نهایت (برحسب ماده خشک فاقد روغن) است (از نظر ریاضی حد تابع جذب روغن به سمت زمان بی‌نهایت برابر این مقدار می‌شود) و در زمان طولانی سرخ‌کردن محتوای روغن برابر با میزان تعادلی (Equilibrium value) می‌باشد. O محتوای روغن جذب‌شده بین زمان t و زمان بی‌نهایت است. فرض شده است که نسبت O بر O_t وابستگی معکوس با زمان فرایند دارد.

می‌یابد. در واقع پس از اتمام آب سطحی محصول و تشکیل پوسته، دمای سطحی شروع به افزایش به سمت دمای روغن می‌کند که از ثانیه ۱۶۰ تا پایان فرایند ادامه دارد (ناحیه C). هرچه دمای فرایند بیشتر باشد طول دوره دمای ثابت در پروفایل دمایی کاهش می‌یابد. در شرایط معمول سرخ کردن مرحله چهارم به نام نقطه پایان حباب به ندرت مشاهده می‌شود (Sahin et al., 1999a).



شکل ۲. تغییرات دمای سطحی محصول طی سرخ کردن در سه دمای متفاوت و مناطق تقریبی مراحل حرارت‌دهی اولیه (A)، جوشش سطحی (B)، نرخ کاهشی (C)

دماهای گوناگون روغن از نظر مرحله نرخ کاهشی (ناحیه C) اختلاف نشان دادند که این امر مربوط به سرعت تشکیل پوسته است. پوسته می‌تواند در جذب روغن نیز به عنوان مانعی مؤثر باشد (Duran et al., 2007). دما فقط در مواد غذایی که به طور کامل خشک شده باشند به حدود بالای نقطه جوش آب می‌رسد (Claeys et al., 2005).

تغییرات محتوای روغن و رطوبت طی فرایند

با توجه به شکل ۳ با شروع فرایند سرخ کردن نرخ کاهش رطوبت محصول زیادتر است. با کاهش رطوبت محصول، به تدریج تغییرات رطوبتی به میزان ثابت می‌رسد. همان‌طور که انتظار می‌رود تبخیر آب در دماهای بالای سرخ کردن سریع‌تر اتفاق می‌افتد و شدت آن در ۶۰ ثانیه ابتدایی فرایند یعنی مرحله حرارت محسوس بیشتر است که به دلیل تبخیر ناگهانی آب آزاد سطحی محصول است (Yildiz et al., 2007). در حین سرخ کردن اختلاف فشار بخار جزئی بین محصول و روغن باعث تبخیر آب می‌شود. این اختلاف فشار جزئی مسلماً در ابتدای فرایند بیشتر است (Sahin et al., 1999). بنابراین پیش‌خشک کردن محصول با کاهش آب آزاد در دسترس موجب کاهش زمان تکمیل فرایند می‌شود (Krokida et al., 2001).

$$\ln K = \ln A_k - \frac{E_a}{RT} \quad (\text{رابطه ۹})$$

با رسم تغییرات خطی $\ln K$ و $\ln O_{eq}$ در برابر عکس دما و به دست آوردن شیب و عرض از مبدا به ترتیب مقادیر E_a و A محاسبه شد.

تعیین دما و زمان بحرانی جذب روغن

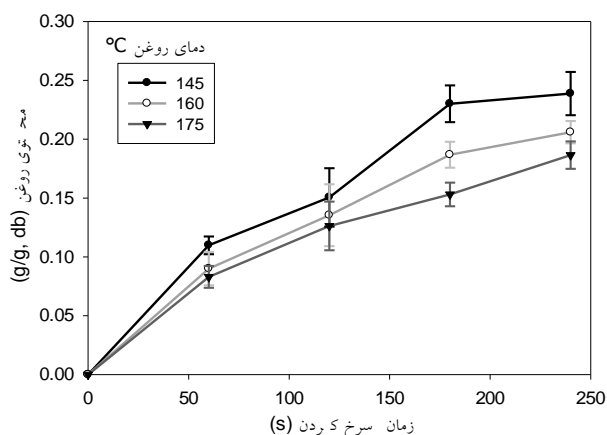
بدین منظور متغیرهای تجربی رطوبت و روغن به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز آماری با نرم‌افزار SPSS-۱۹ به صورت طرح کاملاً تصادفی (CRD) در قالب فاکتوریل با سطح اطمینان ۹۹ درصد با فاکتور دما و زمان انجام شد و مقایسه میانگین به صورت آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

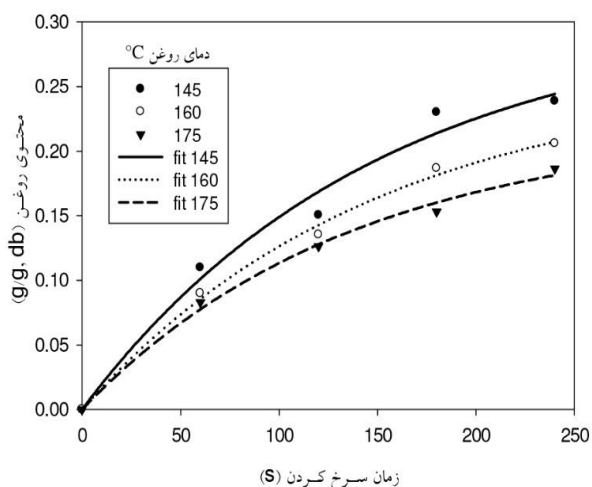
تفکیک مراحل گوناگون سرخ کردن

به منظور جداسازی مراحل گوناگون فرایند سرخ کردن از نظر زمانی بررسی تغییرات دمای سطحی و مرکزی محصول لازم است دمای مرکزی محصول برای هر سه دمای روغن پس از رسیدن به نقطه جوش آب تا پایان به صورت یکنواخت ثابت ماند. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، براساس تغییرات دمای سطحی، مرحله پیش‌حرارت‌دهی (ناحیه A) همزمان با ورود محصول به روغن آغاز می‌شود و طی آن دمای سطحی محصول کمتر از نقطه جوش آب است (Lioumbas et al., 2012). به عبارت دیگر افزایش محسوس دما قبل از رسیدن به تبخیر در دمای ثابت، مرحله حرارت‌دهی اولیه است. با پیشرفت فرایند سرخ کردن و رسیدن دمای مرکزی محصول به نقطه جوش، این مرحله محدود می‌شود که در شرایط این آزمایش حدود ۶۰ ثانیه ابتدایی برآورد شد. با رسیدن دمای محصول به حدود نقطه جوش آب، در ابتدا به دلیل فشار بخار ناشی از تبخیر و حبس حباب‌های بخار در محصول به دلیل تشکیل پوسته، نقطه جوش آب طبق قوانین ترمودینامیکی با زیاد شدن فشار ناشی از وجود بخار، افزایش می‌یابد. با کاهش نرخ تبخیر آب و فاز جوشش، نقطه جوش آب کاهش می‌یابد اما به دلیل وجود اجزای محلول اندکی بیش از 100°C باقی می‌ماند (Budzaki & Seruga, 2004). بنابراین مرحله دوم به صورت جوشش سطحی است که با توجه به سینتیک دمایی ثبت شده در بازه زمانی ۱۶۰-۶۰ ثانیه (حدود ۱۰۰ ثانیه) به طول می‌انجامد (ناحیه B). مرحله سوم که طولانی‌ترین مرحله است به نام مرحله کاهش نرخ آب‌زدایی یا مرحله نرخ کاهشی است که در این مرحله دمای سطحی شروع به افزایش می‌کند و ناحیه کاملاً آبگیری‌شده پوسته توسعه

مدل روی هم انطباق داشتند، در این مقاله فقط تغییرات مدل نمایی (مدل ۲) در شکل ۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است که مدل ۱ نیز تغییراتی مشابه را نشان داد و اطلاعات مربوط به برازش در جدول ۱ مشخص شده است.

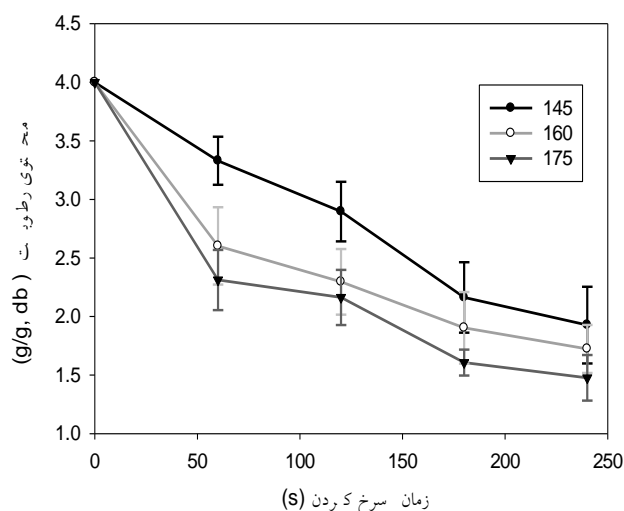


شکل ۴. تغییرات محتوای روغن خلال سیب‌زمینی طی سرخ کردن در سه دمای متفاوت به همراه انحراف معیار



شکل ۵. برازش مدل نمایی سینتیک جذب روغن (مدل ۲) روی داده‌های تجربی در دماهای متفاوت طی فرایند سرخ کردن

برای مقایسه مدل‌های برازش‌شده از دو معیار R^2 و RMSE استفاده شد. از نظر رگرسیون غیرخطی، مدلی که دارای R^2 بالا و RMSE پایین باشد، داده‌های تجربی جذب روغن را به خوبی برازش کرده است. مطابق جدول ۱ هر دو مدل به کاررفته در این پژوهش برازش مطلوبی را روی داده‌های تجربی نشان دادند اما اطلاعات مربوط به مدل ۱ به خصوص برای دماهای بالا (دمای 175°C) اندکی مطلوب‌تر به نظر می‌رسد. این مدل نشان می‌دهد که جذب روغن طی سرخ کردن در زمان‌های کوتاه رفتار خطی دارد ولی برای زمان‌های طولانی رفتار مستقل از زمان نشان می‌دهد. با اینکه دو مدل مطلوبیت



شکل ۳. تغییرات محتوای رطوبت خلال سیب‌زمینی طی سرخ کردن در سه دمای متفاوت به همراه انحراف معیار

شکل ۴ تغییرات محتوای روغن محصول طی فرایند سرخ کردن را نشان می‌دهد. کاهش رطوبت در محصول با ایجاد خلل و فرج باعث جذب روغن می‌شود. جذب روغن با افزایش زمان سرخ کردن زیاد می‌شود. جذب روغن افزایشی نسبتاً سریع را در ۶۰ ثانیه ابتدایی آغاز فرایند نشان می‌دهد که دلیل آن می‌تواند جانشینی آب تبخیرشده از محصول باشد. بنابراین مرحله اول فرایند سرخ کردن یعنی حرارت محسوس می‌تواند از نظر تغییرات محتوای رطوبت و روغن محصول شایان توجه باشد. در مراحل دیگر فرایند به صورت مرحله جوشش سطحی و نرخ کاهشی، شدت تغییرات روغن به تدریج کمتر شد. در واقع در بخش‌های انتهایی نمودار جذب روغن برای هر سه دما، کاهش میزان روغن جذب شده طی زمان مشاهده شد که علت آن می‌تواند ساختار فشرده شده محصول باشد که به عنوان مانعی برای نفوذ روغن عمل می‌کند. طی سرخ کردن با محدود شدن محتوای آب، جذب روغن افزایش می‌یابد. در دماهای بالاتر سرخ کردن جذب روغن اغلب کاهش می‌یابد، زیرا با کوتاه‌تر شدن مدت زمان فرایند، دمای بالا موجب تشکیل سریع پوسته می‌شود که به عنوان مانعی فیزیکی در برابر نفوذ روغن عمل می‌کند (Dobarganes et al., 2000). از نظر تجربی افزایش دمای روغن نیز موجب کاهش جذب روغن شده است (Kita & Lisinska, 2005).

سینتیک جذب روغن محصول

شکل ۵ منحنی مدل‌های برازش‌شده روی داده‌های تجربی روغن برای دماهای گوناگون را نشان می‌دهد. از آنجاکه هر دو

خلل و فرج در محصول باشد. بنابراین برای داشتن محصولی با محتوای روغن کمتر شرایط فرایند به صورت دمای بالا و زمان کم توصیه می شود. تا زمانی که تبخیر شدت داشته باشد نرخ مهاجرت روغن به داخل محصول تقریباً متوقف می شود. نرخ تبخیر آب وابسته به اختلاف دمای بین روغن و نقطه جوش آب و همچنین محتوای آب محصول است که هر چه بیشتر باشد، شدت تبخیر افزایش می یابد (Vitrac et al., 2002). در این پژوهش مشاهده شد که نرخ نفوذ روغن با شروع تبخیر مرکزی (رسیدن دمای مرکز به 100°C) حدوداً از ثانیه ۶۰ به بعد در مقایسه با ابتدای فرایند، کمتر شد. بنابراین با توجه به مشاهدات، بهترین زمان برای خروج محصول از بستر روغن، قبل از شروع مرحله نرخ کاهشی است که تبخیر همچنان با شدت زیاد ادامه داشته و پوسته تشکیل شده و هسته داخلی نیز کاملاً پخته و ژلاتینه شده است و شدت تبخیر از نفوذ روغن می کاهد (Farkas et al., 1996). برای رسیدن به این شرایط میزان بارگذاری محصول در سرخ کن اهمیت دارد و نیازمند بررسی است.

ارتباط بین میزان محتوای روغن تعادلی و ثابت سینتیکی جذب روغن با دمای سرخ کردن با کمک معادله آرنیوس بررسی شد و نمونه ای از خطی سازی معادله آرنیوس برای تغییرات محتوای روغن تعادلی در شکل ۷ نشان داده شده است. ثابت های آرنیوس محاسبه شده برای هر یک از پارامترهای O_{eq} و K در جدول ۲ نشان داده شده است. انرژی فعال سازی منفی برای محتوای تعادلی روغن نیز نشان دهنده ارتباط معکوس این پارامتر با دمای روغن است. نتایج این تحقیق با مشاهده Pedreschi و Moyano (2006) مطابقت دارد.

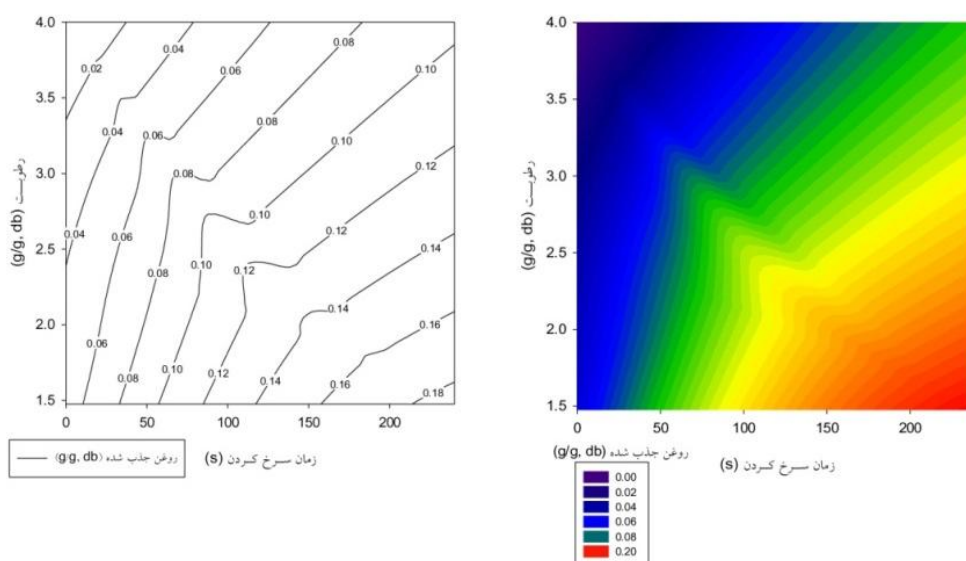
برازش تقریباً برابری را نشان می دهند اما در تخمین پارامترهای تابع جذب روغن به صورت محتوای تعادلی روغن (محتوای روغن در زمان بی نهایت) و ثابت سینتیکی جذب روغن تفاوت دارند. در هر دو مدل با افزایش دمای بستر فرایند میزان ثابت سینتیک جذب روغن K_0 نسبتاً زیاد می شود ولی این افزایش معنی دار نیست ($P \leq 0.05$).

از طرفی میزان تعادلی روغن O_{eq} با افزایش دمای سرخ کردن کاهش می یابد که مدل ۲ این اختلاف را به صورت معنی دار نشان نمی دهد در حالی که مدل ۱ این اختلاف را معنی دار نشان می دهد و دمای 160°C مرز معنی داری است و به عنوان دمای بحرانی می تواند مشخص گردد. میزان محتوای تعادلی روغن پیش بینی شده توسط مدل ۱ در مقایسه با مدل ۲ برای دماهای متفاوت بیشتر است (محتوای روغن تعادلی 0.45 در برابر 0.3 گرم روغن بر حسب ماده خشک بدون چربی در دمای 145°C). تغییرات ثابت سینتیک جذب روغن در مقایسه با محتوای تعادلی روغن با افزایش دما میزان ناچیزی است که این امر نشان می دهد محتوای نهایی روغن محصول وابستگی بیشتری به پارامتر O_{eq} در مقایسه با K_0 دارد. بنابراین مجموع اطلاعات حاصل از برازش منحنی، کاهش جذب روغن در دماهای بالا را تأیید می کند. بسیاری از محققان مانند (2010) Nema & Ahromrit گزارش کردند که جذب روغن محصول نهایی با افزایش دمای سرخ کردن محدود می شود. از طرفی شکل ۵ نمودار توپوگرافی تغییرات روغن جذب شده را به عنوان تابعی از زمان و محتوای رطوبت محصول در دماهای بالا نشان می دهد. آنچه از این شکل استنباط می شود این است که حداکثر روغن جذب شده به زمان های طولانی تر فرایند و محتوای رطوبت کم محصول مربوط می شود که این امر می تواند به دلیل ایجاد

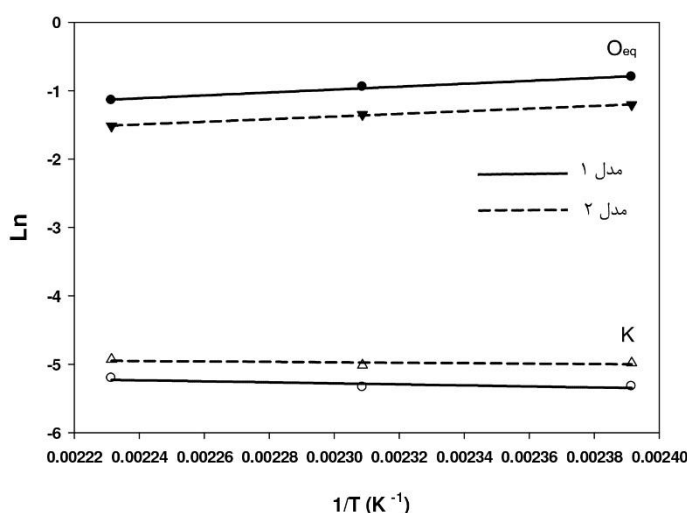
جدول ۱. اطلاعات برازش مدل های سینتیکی روی داده های تجربی جذب روغن

RMSE	R^2	SSE	پارامترهای مدل		دمای روغن ($^{\circ}\text{C}$)	برازش
			K (1/s)	O_{eq} (g/g, db)		
۰/۰۱۵۲۱	۰/۹۸۱۹	۰/۰۰۰۶۹۳۹	۰/۰۰۴۸۷۱ ± ۰/۰۰۲ ^a	۰/۴۵ ± ۰/۰۷ ^a	۱۴۵	مدل ۱
۰/۰۰۵۷۹۵	۰/۹۹۶۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴۸۱۹ ± ۰/۰۰۲ ^a	۰/۳۹ ± ۰/۰۵ ^{ab}	۱۶۰	
۰/۰۰۴۸۵۲	۰/۹۹۶۶	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۵۵ ± ۰/۰۰۳ ^a	۰/۳۲ ± ۰/۰۳ ^b	۱۷۵	
۰/۰۱۵۲۱	۰/۹۸۱۹	۰/۰۰۰۶۹۴	۰/۰۰۶۸۸۶ ± ۰/۰۰۰۶ ^a	۰/۳۰ ± ۰/۱۶۸ ^a	۱۴۵	مدل ۲
۰/۰۰۵۹۳	۰/۹۹۶۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۶۶۴۵ ± ۰/۰۰۳۱۸ ^a	۰/۲۶ ± ۰/۰۰۶۶ ^a	۱۶۰	
۰/۰۰۶۰۵۷	۰/۹۹۶۷	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۷۲۳ ± ۰/۰۰۳۸ ^a	۰/۲۲ ± ۰/۰۵۸ ^a	۱۷۵	

* حروف مقایسه بین ردیف ها در هر مدل هستند.



شکل ۶. توپوگرافی تغییرات جذب روغن و رطوبت در دمای ۱۶۰°C طی سرخ کردن



شکل ۷. مدل خطی معادله آرنیوس برازش شده روی لگاریتم نمایی داده‌های O_{eq} و K حاصل از مدل ۱ و ۲ در برابر عکس دما

جدول ۲. پارامترهای معادله آرنیوس محاسبه شده برای میانگین متغیرهای مدل جذب روغن

پارامتر	مدل جذب روغن	انرژی فعال سازی (kJ/mol)	ثابت A	R^2	RMSE
O_{eq}	مدل ۱	-۱۷۶۶۷/۲۵	۰/۰۰۲۸۲۵	۰/۹۸۷۴	۰/۰۲۷۱۶
	مدل ۲	-۱۶۰۸۷/۵۹	۰/۰۰۲۹۴۹	۰/۹۹۵۸	۰/۰۱۴۱۶
K	مدل ۱	۶۲۱۸/۸۷۲	۰/۰۲۸۴۶۷	۰/۶۶۵۵	۰/۰۶۰۰۵
	مدل ۲	۲۶۵۷/۱۵۴	۰/۰۱۴۴۵۰	۰/۳۶۰۷	۰/۰۴۸۱۸

به جدول اختلاف بین دمای ۱۷۵°C با دماهای ۱۶۰ و ۱۴۵°C معنی دار شد، در حالی که اختلاف تأثیر دمای ۱۶۰ و ۱۴۵°C روی محتوای رطوبت محصول در زمان‌های متفاوت معنی دار به دست نیامد. بنابراین دمای ۱۷۵°C به عنوان دمای بالای فرایند سرخ کردن موجب کاهش سریع تر رطوبت محصول می شود. در واقع می توان گفت حداقل دمای لازم برای فراوری در

تعیین دما و زمان بحرانی به منظور تعیین دمای بحرانی تغییرات جذب روغن، محتوای رطوبت و روغن در زمان‌های گوناگون به صورت آماری بررسی شد. جدول ۳ مقایسه میانگین داده‌های حاصل از رطوبت سنجی را به همراه انحراف معیار بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن با سطح اطمینان ۹۹ درصد نشان می دهد. با توجه

مشاهده شد. نتایج این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. از مقایسه دو جدول ۳ و ۴ نتیجه گیری می شود که زمان بحرانی مشاهده شده برای رطوبت یعنی ۱۸۰-۱۲۰ ثانیه در معنی دار شدن اختلاف محتوای روغن در طول فرایند نیز مؤثر است، زیرا از دقیقه سوم به بعد اختلاف محتوای روغن طی فرایند برای هیچ یک از دماها معنی دار نشد و با توجه به جدول در زمان های ابتدایی فرایند جذب روغن تا زمان ۱۸۰ ثانیه همواره با گذشت زمان افزایش معنی داری در دماهای گوناگون داشته است. این نتایج تثبیت کننده تأثیر مثبت فرآوری دمای بالا با زمان کوتاه در کاهش جذب روغن است. با توجه به شکل توابع مدل جذب روغن می توان گفت که محتوای روغن در هر لحظه براساس محتوای روغن تعادلی سنجیده می شود (Duran *et al.*, 2007).

دمای بالا دمای ۱۶۰°C است. این رفتار معنی دار شدن، مشابه با رفتار مدل (مطابق جدول ۱) برای جذب روغن در زمان بی نهایت است. Guillaumin (1988) نیز بیان کرد که دمای بین ۱۵۰ تا ۱۸۰ °C تأثیر معنی داری روی میزان روغن جذب شده توسط ماده غذایی ندارد. با مقایسه زمان های آزمون شده برای دماهای گوناگون فاصله زمانی ۱۸۰-۱۲۰ ثانیه در دماهای متفاوت زمان بحرانی برای تغییرات معنی دار رطوبت محصول طی فرایند به دست آمد که این امر نشان می دهد که مطابق با تقسیم بندی انجام شده براساس تغییرات دمایی، با توجه به داده های رطوبتی نیز پایان مرحله جوشش سطحی قبل از زمان ۱۸۰ ثانیه است. برای داده های مربوط به روغن (برحسب گرم روغن بر گرم ماده خشک ثابت) نیز برای دماهای آزمایش شده اختلاف معنی دار مشابه داده های رطوبت سنجی

جدول ۳. میانگین محتوای رطوبت از محصول به همراه انحراف معیار (آلفا=۰/۰۱)

زمان (S)				دمای روغن (°C)
۲۴۰	۱۸۰	۱۲۰	۶۰	
۱/۹۲۶±۰/۳۲۷ ^{Ab}	۲/۱۶۳±۰/۳۰۱ ^{Ab}	۲/۸۹۶±۰/۲۵۴ ^{Aa}	۳/۳۳±۰/۲۰۵ ^{Aa}	۱۴۵
۱/۷۲۳±۰/۲۰۵ ^{Bb}	۱/۹۰۳±۰/۳۰۵ ^{Bb}	۲/۲۹۶±۰/۲۸ ^{Ba}	۲/۶۰۳±۰/۳۳ ^{Ba}	۱۶۰
۱/۴۷۶±۰/۱۹۴ ^{Bb}	۱/۶۰۶±۰/۱۱ ^{Bb}	۲/۱۶۳±۰/۲۳۶ ^{Ba}	۲/۳۱۲±۰/۲۵۷ ^{Ba}	۱۷۵

* حروف بزرگ مقایسه بین دماها و حروف کوچک مقایسه بین زمان ها (حروف یکسان اختلاف معنی دار ندارند).

جدول ۴. میانگین محتوای روغن محصول به همراه انحراف معیار (آلفا=۰/۰۱)

زمان (S)				دمای روغن (°C)
۲۴۰	۱۸۰	۱۲۰	۶۰	
۰/۲۳۸±۰/۰۱۸ ^{Ac}	۰/۲۳±۰/۰۱۵ ^{Ac}	۰/۱۵۵±۰/۰۲۴ ^{Ab}	۰/۱۰۹±۰/۰۰۷ ^{Aa}	۱۴۵
۰/۲۰۶±۰/۰۰۹ ^{ABc}	۰/۱۸۶±۰/۰۱۱ ^{ABc}	۰/۱۳۵±۰/۰۲۶ ^{ABb}	۰/۰۹±۰/۰۱۴ ^{ABa}	۱۶۰
۰/۱۸۶±۰/۰۱۱ ^{Bc}	۰/۱۵۳±۰/۰۱ ^{Bc}	۰/۱۲۶±۰/۰۲ ^{Bb}	۰/۰۸۳±۰/۰۰۹ ^{Ba}	۱۷۵

* حروف بزرگ مقایسه بین دماها و حروف کوچک مقایسه بین زمان ها (حروف یکسان اختلاف معنی دار ندارند).

نتیجه گیری
در این پژوهش، تأثیر دما بر پدیده جذب روغن طی فرایند سرخ کردن با استفاده از دو مدل ریاضی بررسی شد و مراحل گوناگون فرایند از این نظر تفکیک شدند. در هر دو مدل بررسی شده در این پژوهش، با افزایش دمای فرایند محتوای روغن تعادلی کاهش نشان داد، اما این روند برخلاف مدل ۱، در مدل ۲ برای دماهای گوناگون آزمون شده معنی دار نبود. بنابراین با توجه به معنی دار نبودن اختلاف مقادیر محاسبه شده برای محتوای روغن تعادلی در مدل ۲ با افزایش دما، می توان گفت از نظر ریاضی مدل نمایی (مدل ۲) توجیه مناسبی برای نشان دادن تأثیر فرایند با دمای بالا بر کاهش جذب روغن نیست. مراحل گوناگون فرایند سرخ کردن با اندازه گیری تغییرات دمایی در مرکز و سطح به صورت مرحله حرارت دهی اولیه (حدود ۶۰ ثانیه ابتدایی)، جوشش سطحی (۱۶۰-۶۰ ثانیه)، و نرخ کاهشی (۲۴۰-۱۶۰ ثانیه) تفکیک شد. بیشترین جذب روغن در زمان های ابتدایی فرایند است، بنابراین دمای بالا با افزایش شدت تبخیر و کاهش زمان فرایند می تواند در کاهش روغن نهایی محصول طی سرخ کردن در شرایط اتمسفری مؤثر باشد.

REFERENCES

Ahromrit, A., & Nema, P.K. (2010). Heat & mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato & taro. *Journal of Food Science & Technology*, 47, 632-637.

Alvis, A., Velez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M., & Villada H.S. (2009). Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Journal of Food Control*, 20, 321-325.

- Res, A., Arguelles, A., Castello, M.L., & Heredia, A. (2012). Mass Transfer & Volume Changes in French Fries During Air Frying. *Journal of Food & Bioprocess Technology*, Doi:10.1007/s11947-012-0861-2.
- AOAC. (1995). Official methods of analysis, 16th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, Unites States.
- Bingol, G., Zhang, A., Pan, Z. & McHugh, T.H. (2012). Producing lowercalorie deep fat fried French fries using infrared dry-blanching as pretreatment. *Journal of Food Chemistry*, 132, 686-692.
- Blumenthal, M.M. (2001). A New Look at Frying Science. *Cereals Foods World*, 46, 352-354.
- Budzaki, S. & Seruga, B. (2005). Moistre Loss & Oil Uptake during Deep Fat Frying of Krostula dough. *European Food Research & Technology*, 220, 90-96.
- Claeys, W. L., De Vleeschouwer, K., & Henrickx, M. E. (2005). Quantifying the formation of carcinogens during food processing: Acrylamide. *Trends in Food Science & Technology*, 16,181-193.
- Dana, D., & Saguy, I.S. (2006). Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying & the surfactant effect theory & myth. *Advances in Colloid & Interface Science*, 128, 267-272.
- Dobarganes M.C., Marquez-Ruiz G., & Velasco, J. (2000). Interactions between fat & food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 102, 521-528.
- Duran, M., Pedreschi, F., Moyano, P., & Troncoso, E. (2007). Oil partition in pre-treated potato slices during frying & cooling. *Journal of Food Engineering*, 81, 257-265.
- Farkas, B.E., Sing R.P., & Rumsey T.R. (1996). Modelling heat & mass transfer in immersion frying. I, Model development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211-226.
- Gamble M.H., Rice, P., & Selman, J.D. (1987). Relationship between Oil Uptake & Moisture Loss during Frying of Potato Slices from C.V. Record UK Tubers. *Journal of Food Science & Technology*, 22, 233-241.
- Gamble, M.H., & Rice, P. (1987). Effect of Pre-Fry Drying on Oil Uptake & Distribution on Potato Crisp Manufacture. *Journal of Food Science & Technology*, 22, 535-548.
- Gertz, C. (2004). Deep frying remains an art. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 106, 713-714.
- Guillaumin, R. (1988). Kinetics of fat penetration in food. In G. Varela, A. E. Bender, & I. D. Morton (Eds.), *Frying of food: Principles, changes, new approaches*. (pp. 82-89). Chichester: Ellis Horwood Ltd.
- Kita, A., & Lisinska, G. (2005). The influence of oil type & frying temperatures on the texture & oil content of French fries. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 85, 2600-2604.
- Kita, A., Lisinska, G., & Gołubowska, G. (2007). The effects of oils & frying temperatures on the texture & fat content of potato crisps. *Journal of Food Chemistry*, 102, 1-5.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z.B. (2000). Water Loss & Oil Uptake as a Function of Frying Time. *Journal of Food Engineering*, 44, 39-46.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B., & Marinou-Kouris, D. (2001). Effects of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*, 49: 347-354.
- Lioumbas, J. S., Kostoglou, M., & Karapantsios, T. D. (2012). On the capacity of a crust-core model to describe potato deep-fat frying. *Food Research International*, 46, 185-193.
- Mellema, M. (2003). Mechanism & reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 364-373.
- Moreira, R.G., & Barrufet, M.A. (1998). A New Approach to Describe Oil Absorption in Fried Foods: A Simulation Study, *Journal of Food Engineering*, 35, 1-22.
- Moyano, P.C., & Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 39, 285-291.
- Pedreschi, F., Hern&ez, P., Figueroa, C., & Moyano, P.C. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties*, 8, 289-299.
- Pedreschi, F., Cocio, C., Moyano, P., Troncoso, E. (2008). Oil distribution in potato slices during frying. *Journal of Food Engineering*, 87, 200-212
- Rice, P., & Gamble, M.H. (1989). Technical Note: Modeling Moisture Loss during Potato Slice Frying. *Journal of Food Science & Technology*, 24, 183-187.
- Rossi, M., Alamprese, C., Ratti, S., & Riva, M. (2009). Suitability of contact angle measurement as an index of overall oil degradation & oil uptake during frying. *Journal of Food Chemistry*. 112, 448-453.
- Saguy, I.S., Ufheil, G., & Livings S. (1998). Oil uptake in deep-fat frying: review. *Ocl-Oleagineux Corps Gras Lipides*, 5, 30-35.
- Sahin, S., Sastry, S.K., & Bayindirli, L. (1999a). Heat Transfer During Frying of Potato Slices, *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 32, 19-24.
- Sahin, S., Sastry, S.K., & Bayindirli, L. (1999b). The determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering*, 39, 307-311.
- Seruga, B., & Budzaki, S. (2005). Determination of thermal conductivity & convective heat transfer coefficient during deep fat frying of "Kroštula" dough. *European Food Research & Technology*, 221, 351-356.
- Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss & oil uptake during vacuum frying of pre-

- treated potato slices. *LWT-Food Science & Technology*, 42, 1164-1173.
- Ufheil, G., & Escher, F. (1996). Dynamics of Oil Uptake during Deep-Fat Frying of Potato Slices. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 29, 640-644.
- Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., Raoult-Wack, A. L. (2002). Characterization of heat & mass transfer during deep-fat frying & its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53, 161-176
- Yildiz, A., Palazoglu, K., & Erdogdu, F. (2007). Determination of heat & mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 11-17.
- Ziaiiifar, A.M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity development & its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*, 33, 191-212.