

مدل‌سازی جذب روغن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی طی فرآیند سرخ کردن عمیق

مهدی برمور^۱ - جلال دهقان‌نیا^{۲*} - بابک قنبرزاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۲۷

چکیده

این تحقیق، با هدف بررسی اثر شرایط فرآیند و پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی با محلول نمک بر انتقال جرم و جذب روغن قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن انجام گرفت. در این پژوهش، پیش‌تیمار اولتراسوند تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دو زمان ۱۰ و ۳۰ دقیقه و پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه و همچنین پیش‌تیمار آبیگری اسمزی با محلول نمک در دو غلظت ۱ و ۳ درصد، روی قطعات سیب‌زمینی اعمال شد و سپس این قطعات در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ شدند. نتایج نشان داد اعمال پیش‌تیمار اولتراسوند به مدت ۱۰ دقیقه، باعث افزایش جذب روغن نسبت به نمونه شاهد می‌شود ولی اعمال این پیش‌تیمار به مدت ۳۰ دقیقه میزان جذب روغن را نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد. همچنین، پیش‌تیمار مایکروویو نیز به شکل غیرمعنی‌دار جذب روغن قطعات سیب‌زمینی را کاهش داد. علاوه بر این، نمونه‌های پیش‌تیمار شده توسط آبیگری اسمزی با محلول نمک باعث کاهش جذب روغن شدند. همچنین، به منظور مدل‌سازی جذب روغن، داده‌های حاصل از آزمایش با ۶ مدل برازش شدند. مدل‌های فوق دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE بودند.

واژه‌های کلیدی: اولتراسوند، مایکروویو، آبیگری اسمزی، سرخ کردن، جذب روغن، ضریب انتشار موثر رطوبت

مقدمه

سرخ کردن عمیق، به عنوان یک فرآیند جهت پخت محصولات مختلف غذایی مانند سیب‌زمینی در نظر گرفته می‌شود که در آن، ماده غذایی در داخل یک روغن مقاوم به حرارت و با نقطه جوش بالاتر از آب (حدود ۲۰۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) سرخ می‌گردد. مطالعات جدید روی فرآیند سرخ کردن مواد غذایی، با هدف پیدا کردن ارتباط بین شرایط فرآیند و تغییرات فیزیکی حاصله در حین آن از جمله کاهش رطوبت و جذب روغن صورت می‌گیرد (Pedreschi & Aguilera, 2002).

فاکتورهای زیادی مثل کیفیت روغن، ترکیب ماده غذایی، درجه حرارت، زمان سرخ کردن و محتوای رطوبت اولیه، می‌توانند روی میزان جذب روغن اثرگذار باشند (Pedreschi et al., 2008). در این فرآیند، انتقال حرارت به صورت کنوکسیون از روغن به سیب‌زمینی

انجام گرفته و همزمان، رطوبت از داخل ماده غذایی به صورت انتشار به خارج آن منتقل می‌شود. با خروج رطوبت، روغن جایگزین آن شده و خصوصیات کیفی ماده غذایی تغییر می‌یابد (Bouchon & Aguilera, 2001). در این فرآیند، واکنش‌های قهوه‌ای شدن، ژلاتینه شدن نشاسته، تشکیل پوسته و دناتوراسیون پروتئین‌ها رخ داده (Vitrac et al., 2002) و منجر به ایجاد عطر و طعم مناسب در محصول سرخ شده نهایی می‌گردند (Freitas et al., 2009). هنگام سرخ شدن سیب‌زمینی در داخل روغن، رطوبت داخلی موجود در آن با افزایش دما تبدیل به بخار شده و باعث ایجاد فشار بخار در داخل سیب‌زمینی می‌شود. در نتیجه فشار بخار ایجاد شده، روغن نمی‌تواند به داخل سیب‌زمینی نفوذ کند (Moreira et al., 1997). بنابراین، در طول سرخ کردن، روغن عمدتاً چسبیده به سطح سیب‌زمینی باقی مانده و بلافاصله بعد از خارج کردن سیب‌زمینی از سرخ‌کن و در مرحله سرد کردن، بخار موجود در آن کندانس شده و یک حالت خلا ایجاد می‌شود (Gamble et al., 1987a)؛ این مساله منجر به مکیده شدن روغن از سطح سیب‌زمینی به داخل آن شده و میزان روغن محصول را افزایش می‌دهد. با استفاده از روش‌هایی مثل پیش‌تیمار اولتراسوند،

۱، ۲، ۳ - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
* - نویسنده مسئول: (Email: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir)

که اگر قطعات سیب‌زمینی در دمای ۶۰ - ۲۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۴ ساعت در داخل محلول ساکارز ۶۰ - ۴۰ درصد و محلول نمک ۱۵ درصد آبیگری شوند، محتوای رطوبت آنها به میزان زیادی کاهش یافته و موقع سرخ کردن میزان جذب روغن کم می‌شود (Eren & Kaymak, 2007). پژوهش مشابه دیگری نشان داده است که اگر سیب‌زمینی‌ها در داخل محلول ۲۰ درصد مخلوطی از گلوکز و نمک (با نسبت یک به یک) قرار گرفته و حدود ۱ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شوند و بعد در داخل روغن کانولا در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱، ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه سرخ گردند، جذب روغن کاهش می‌یابد (Ikoko & Kuri, 2007).

شناخت پدیده‌های پیچیده مثل انتقال جرم که حین فرآیند سرخ‌کردن عمیق مواد غذایی اتفاق می‌افتد، به منظور طراحی و مدل‌سازی بهینه این فرآیند با هدف کاهش جذب روغن محصول سرخ‌شده ضروری می‌باشد. در حالت کلی، سرخ‌کردن عمیق شامل سه نوع انتقال جرم متفاوت شامل مهاجرت آب از بخش داخلی ماده غذایی به سطح آن، تراوش ترکیبات جامد به داخل روغن و جذب روغن به داخل ماده غذایی و جایگزینی آن با رطوبت می‌باشد (Blumenthal, 1991). مدل‌سازی جذب روغن، روابط بین متغیرهای گوناگون، از جمله محتوای روغن و زمان را ارائه می‌دهد و می‌تواند اطلاعاتی در ارتباط با میزان جذب روغن در زمان‌های مختلف یا آهنگ جذب روغن توسط ماده غذایی طی این فرآیند را فراهم کند. بنابراین، می‌توان با کنترل دما و زمان فرآیند سرخ‌کردن و با استفاده از این مدل‌ها، میزان جذب روغن را در محصول سرخ‌شده نهایی کاهش داد.

بر اساس اطلاعات موجود در منابع مختلف، تاکنون تأثیر تلفیقی پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی به صورت همزمان در فرآیند سرخ‌کردن بررسی نشده است. بنابراین، این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر تلفیقی پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی بر جذب روغن و سایر ویژگی‌های کمی و کیفی شامل چروکیدگی، ضریب انتشار موثر رطوبت، محتوای رطوبت و دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن و همچنین مدل‌سازی جذب روغن انجام شد.

مواد و روش‌ها

مواد

سیب‌زمینی‌های مورد استفاده از بازار محلی تهیه و قبل از سرخ‌شدن در سردخانه بالای صفر درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی که مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه بود، برای سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی به کار برده شد.

مایکروویو، آبیگری اسمزی، آنزیم‌بری، پوشش‌های خوراکی و خشک‌کردن با هوا، می‌توان میزان جذب روغن را در محصول کاهش داده و خصوصیات کمی و کیفی را در محصول سرخ شده نهایی بهبود بخشید (Krokida et al., 2000).

امواج اولتراسوند با ایجاد لرزش و انقباض و انبساط‌های پی‌پی در داخل ماده غذایی، یک سری کانال‌های ریزمیکروسکوپی در داخل ماده غذایی تشکیل داده و باعث تسهیل خروج رطوبت از این کانال‌ها می‌گردند. تحقیقات نشان داده‌اند که امواج اولتراسوند، باعث افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت می‌شود (Ortuno et al., 2010). در پژوهشی، اثر اولتراسوند به عنوان پیش‌تیمار در خشک‌کردن قطعات موز مورد بررسی قرار گرفته است (Fernandes & Rodrigues, 2007). نتایج این تحقیق نشان داد که اگر قطعات موز در داخل یک محلول آبی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، در برابر امواج اولتراسوند با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه قرار داده شوند، میزان ضریب انتشار موثر رطوبت با گذشت زمان از $10^{-6} \times 4/61$ به $10^{-6} \times 5/08$ متر مربع بر ساعت افزایش یافته و باعث خروج سریع رطوبت از ماده غذایی می‌گردد.

تاکنون بر اساس منابع در دسترس، اثر پیش‌تیمار اولتراسوند بر میزان جذب روغن در فرآیند سرخ‌کردن بررسی نشده است؛ اما انتظار بر این است که افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت، می‌تواند خروج رطوبت را تسهیل نموده و با کاهش مدت زمان لازم برای سرخ‌کردن، جذب روغن را کاهش دهد. یکی دیگر از پیش‌تیمارهای مورد استفاده قبل از فرآیند سرخ‌کردن، مایکروویو می‌باشد. هنگام استفاده از مایکروویو به عنوان پیش‌تیمار، محتوای رطوبت اولیه ماده غذایی کاهش می‌یابد؛ بنابراین، میزان رطوبت خارج شده از ماده غذایی در طول سرخ‌کردن، کاهش یافته و در نهایت روغن کمتری وارد محصول می‌شود. از دیگر روش‌های مورد استفاده جهت کاهش جذب روغن، استفاده از پیش‌تیمار آبیگری اسمزی می‌باشد. طی آبیگری اسمزی با محلول نمک، محتوای رطوبت اولیه ماده غذایی کاهش داده شده و در نهایت میزان جذب روغن محصول کمتر می‌شود (Moyano et al., 2002).

در تحقیقی، اثر آبیگری اسمزی به عنوان پیش‌تیمار روی سرخ‌کردن سیب‌زمینی مورد بررسی قرار گرفته است (Krokida et al., 2001). در این تحقیق، ابتدا آبیگری سیب‌زمینی با استفاده از چهار محلول شامل ساکارز ۴۰ درصد (وزنی - وزنی)، نمک ۲۰ درصد (وزنی - وزنی)، مالتودکسترین (۱۲) ۲۰ درصد (وزنی - وزنی) و مالتودکسترین (۲۱) ۲۰ درصد (وزنی - وزنی) در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۳ ساعت صورت گرفته و سپس، سرخ‌کردن در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که آبیگری اسمزی باعث کاهش محتوای رطوبت، جذب روغن و دانسیته ظاهری می‌گردد. نتایج حاصل از یک تحقیق دیگر نشان داده است

روش‌ها تجهیزات

گزارش گردید (AOAC, 1990).

محتوای روغن

میزان روغن نمونه‌های سرخ‌شده با استفاده از دستگاه سوکسله و از طریق استخراج به وسیله حلال پترولیوم اتر اندازه‌گیری شد و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد (AOAC, 1995).

میزان چروکیدگی

برای به دست آوردن میزان چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری اولیه نمونه‌ها قبل از سرخ‌کردن (V_0) و بعد از سرخ‌کردن (V_t)، با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد:

$$V = (M + M_1 - M_2) / \rho \quad (1)$$

در رابطه فوق، V حجم ظاهری (cm^3)، M وزن نمونه (gr)، M_1 وزن پیکنومتر خالی و حلال (gr)، M_2 وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (gr) و ρ دانسیته تولوئن (gr/cm^3) می‌باشد. در مرحله بعد با استفاده از رابطه ۲، میزان چروکیدگی در هر لحظه از زمان سرخ‌کردن تعیین شد (Ziaifar et al., 2010):

$$S_{(t)} = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \quad (2)$$

در این رابطه، $S_{(t)}$ درصد چروکیدگی، V_0 حجم ظاهری نمونه خام (cm^3) و V_t حجم ظاهری نمونه پس از سرخ‌شدن (cm^3) می‌باشد.

دانسیته ظاهری

دانسیته ظاهری از تقسیم وزن محصول بر حجم ظاهری آن در هر لحظه از سرخ‌کردن به دست می‌آید (Ziaifar et al., 2010):

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3)$$

در این رابطه ρ دانسیته ظاهری محصول (gr/cm^3)، M جرم محصول (gr) و V حجم ظاهری محصول (cm^3) می‌باشد.

مدل‌سازی ریاضی جذب روغن

در این مطالعه، از شش مدل تجربی (جدول ۲) برای مدل‌سازی جذب روغن به صورت تابعی از زمان استفاده شد. همچنین، سه مدل دیگر نیز به صورت تابعی از چروکیدگی، دانسیته ظاهری و محتوای رطوبت محصول پیشنهاد شد. برای تعیین بهترین مدل از دو معیار ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. از این رو، مدل‌هایی که دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین میزان RMSE بودند، به عنوان بهترین مدل انتخاب شدند.

در این تحقیق، از یک سرخ‌کن Moulinex (مدل F430R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°C و دارای سنسور دمایی (ترموستات) توکار^۱ برای کنترل ترموستاتیکی دما با دقت $\pm 3^\circ\text{C}$)، دستگاه اولتراسوند (مدل USD - 4R)، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و همچنین زمان اولتراسونیکاسیون، دستگاه مایکروویو (سامسونگ مدل CS4550، ساخت کره) و هیتر (مدل Tap-210-HS، ساخت ایران، مجهز به سیستم تنظیم دما) استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه، سیب‌زمینی‌ها ۲۴ ساعت قبل از آزمایش، در دمای اتاق نگهداری شدند. موقع آزمایش، نمونه‌ها بعد از شستشو، پوست‌گیری شده و با استفاده از یک کاتر دستی به قطعاتی با ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2$ (ارتفاع، عرض و طول) سانتی‌متر، برش داده شدند. سپس با استفاده از آب مقطر، نشاسته سطحی آن‌ها گرفته شده و بعد از آن، آب اضافی سیب‌زمینی‌ها با استفاده از کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. در نهایت، نمونه‌ها برحسب نوع پیش‌تیمار، به چند دسته تقسیم شدند (جدول ۱).

شرایط سرخ‌کردن

در هر آزمایش پس از آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس جدول ۱، ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شد و بعد از تنظیم دما و زمان، بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد. پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای مورد نظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به میزان ۱۲۰ - ۱۰۰ گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند و سپس سبد حاوی نمونه‌ها، به طور اتوماتیک در داخل روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ‌شدن نمونه‌ها به مدت زمان مورد نظر، سیب‌زمینی‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شده و روغن اضافی آنها توسط یک کاغذ جاذب گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه روی آنها انجام گرفت. تمامی آزمایش‌ها با ۲ تکرار انجام شد و داده‌های گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها، از طریق خشک‌کردن آنها در آون کنوکسیون در دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد و در نهایت بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن

1- Built-in temperature sensor

ضرایب به صورت تابعی از شرایط فرآیند (متغیرهای مرتبط با پیش- تیمارهای اولتراسوند، میکروویو، آبیگری اسمزی، دما و زمان فرآیند) در نظر گرفته شدند. مبنای انتخاب این مدل‌ها نیز بر اساس ضریب همبستگی بالای آن‌ها بود.

پارامترهای مربوط به این مدل‌ها، از طریق برازش کردن داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.06.635, R2012a) به دست آمدند. به منظور به دست آوردن ضرایب ثابت مدل‌ها نیز، تجزیه و تحلیل رگرسیون چندمتغیره با استفاده از نرم‌افزار EXCEL 2007 انجام شد. این

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	۱
U10	اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه	۲
U30	اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه	۳
O1	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۱ درصد	۴
O3	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۳ درصد	۵
M	مایکروویو	۶
O1U10M	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۱ درصد - اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه - مایکروویو	۷
O1U30M	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۱ درصد - اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه - مایکروویو	۸
O3U10M	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۳ درصد - اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه - مایکروویو	۹
O3U30M	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۳ درصد - اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه - مایکروویو	۱۰

۱: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دما و زمان مورد نظر سرخ شدند.

۲ و ۳: نمونه‌هایی که جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در حمام اولتراسوند در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۰ و ۳۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش تیمار آبیگری اسمزی با محلول نمک در غلظت ۱ و ۳ درصد سدیم کلرید و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت، به طور مجزا قرار داده شدند.

۶: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش تیمار مایکروویو، در توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۷، ۸، ۹ و ۱۰: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی با محلول نمک، ابتدا در حمام اولتراسوند در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان‌های ۱۰ و ۳۰ دقیقه به طور مجزا قرار داده شدند و سپس در داخل محلول اسمزی ۱ و ۳ درصد و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۳ ساعت آبیگری شده و در نهایت در داخل دستگاه مایکروویو در توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه خشک شدند.

جدول ۲- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان

شماره	مدل ریاضی	مرجع
۱	$O = \frac{at^b}{1+t}$	پیشنهادی
۲	$O = at^b$	پیشنهادی
۳	$O = \frac{1+t}{at+b}$	پیشنهادی
۴	$O = \exp(-at^b)$	پیشنهادی
۵	$O = \frac{abt}{1+bt}$	مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶)
۶	$O = a.(1 - \exp(-bt))$	کروکیدا و همکاران (۲۰۰۶)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار (۱۰×۳×۴×۲=۲۴۰) سرخ شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. برای انجام

در این مطالعه، ۱۰ تیمار نشان داده شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰

بنابراین، آهنگ افزایش محتوای روغن کاهش یافته و به یک حالت تعادلی می‌رسد. مشابه چنین نتایجی در تحقیقات دیگری مشاهده گردیده است (Ngadi et al., 2009 & Sukumar et al., 2009).

در مورد تاثیر دما بر میزان جذب روغن، گزارشات متعددی ارائه شده است. برخی از محققین، بر این باورند که افزایش دما منجر به کاهش جذب روغن می‌شود و دلیل آن را به این صورت بیان کرده‌اند که افزایش دما باعث خروج سریع رطوبت از ماده غذایی شده و مدت زمان لازم برای سرخ کردن را کم می‌کند (Marisol et al., 2007).

همچنین، با تشکیل سریع پوسته سخت در ماده غذایی، یک مانع در برابر ورود روغن به ماده غذایی ایجاد شده و میزان جذب روغن را کاهش می‌دهد. اما برخی دیگر از محققین، عقیده دارند که افزایش دما میزان جذب روغن را افزایش می‌دهد (Franco et al., 2007). در این مطالعه نیز افزایش دما باعث افزایش جذب روغن در محصول گردید؛ اما این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. در واقع، افزایش دما باعث خروج مقدار زیاد رطوبت از ماده غذایی در مدت زمان کوتاه شده بنابراین، روغن زیادی جایگزین رطوبت می‌شود و در نتیجه جذب روغن افزایش می‌یابد. Bouchon و همکاران (۲۰۰۳) و Franco و همکاران (۲۰۰۷)، در مطالعات تحقیقاتی خود به نتایج مشابهی دست یافته‌اند.

از طرف دیگر، کاهش محتوای رطوبت با گذشت زمان، منجر به افزایش میزان جذب روغن در نمونه‌های شاهد شد (شکل ۱-ب). افزایش دما در محتوای رطوبت بالا و در زمان‌های اولیه سرخ کردن، باعث افزایش میزان جذب روغن در نمونه‌ها گردید؛ ولی در محتوای رطوبت کمتر از ۳ گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن و در لحظات آخر سرخ کردن با افزایش دما از ۱۷۰ به ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد میزان جذب روغن کاهش یافت. چنین نتایجی در مطالعات دیگری نیز مشاهده گردیده است (Moyano & Pedreschi, 2006 & Ziaifar et al., 2010). در دماهای بالاتر از ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های آخر سرخ کردن، به دلیل بیشتر بودن دما، پوسته سخت در سیب‌زمینی تشکیل می‌گردد که مانع از ورود بیشتر روغن به ماده غذایی می‌گردد.

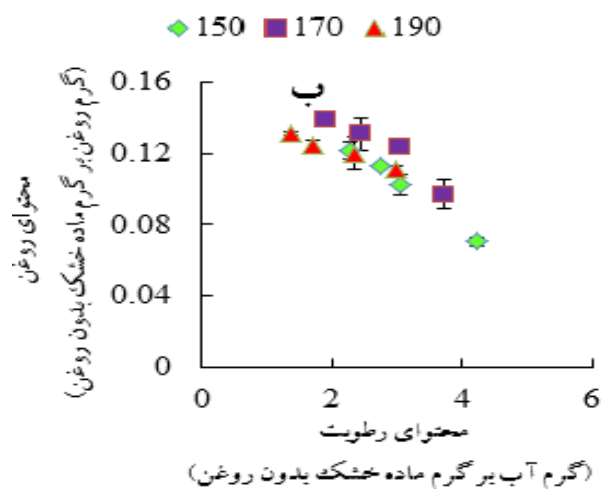
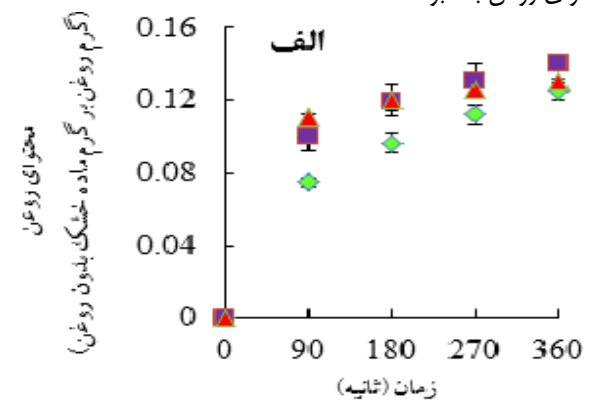
شکل ۲-الف، منحنی تغییرات محتوای روغن را در زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه و دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای پیش‌تیمارهای آبیگری اسمزی با محلول‌های نمک ۱ و ۳ درصد، اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز (زمان‌های ۱۰ و ۳۰ دقیقه) و مایکروویو با توان ۵ وات بر گرم به صورت مجزا نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، محتوای روغن نمونه‌ها با گذشت زمان در تمامی پیش‌تیمارها افزایش پیدا کرد. همچنین، میزان جذب روغن در نمونه‌های شاهد در مقایسه با تیمارهای دیگر (به جز پیش‌تیمار اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه) در تمام زمان‌های سرخ کردن بیشتر بود. علاوه بر این، مقایسه بین پیش‌تیمارها نشان داد که پیش‌تیمار

مقایسه میانگین از آزمون بونفرونی^۱ در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) در تمامی داده‌های آزمایشی استفاده شد (Steel et al., 1997).

نتایج و بحث

جذب روغن

محتوای روغن نمونه‌های سرخ‌شده با گذشت زمان سرخ کردن افزایش یافت (شکل ۱-الف). افزایش روغن در لحظات اولیه سرخ کردن به صورت نمایی بوده و به دلیل بالا بودن میزان رطوبت محصول و عدم تشکیل پوسته سخت در لحظات اولیه، آهنگ افزایش محتوای روغن بالا بود.



شکل ۱-ب محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده (نمونه شاهد) به عنوان تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبت (ب) طی سرخ کردن عمیق در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد با گذشت زمان سرخ کردن و رسیدن به محتوای رطوبت تعادلی و همچنین تشکیل پوسته سخت، خروج رطوبت از محصول کمتر شده،

1- Bonferroni

جذب روغن می‌گردند؛ به این صورت که موقع سرخ کردن و هنگام تشکیل پوسته، منافذ موجود در سطح پوسته توسط مواد جامد محلول پر شده و یک مانع در برابر ورود روغن به داخل ماده غذایی ایجاد می‌کنند و در نتیجه میزان جذب روغن محصول را کمتر می‌کنند.

شکل ۲- ب، تغییرات محتوای روغن را در نمونه‌های پیش تیمار شده به صورت تلفیقی و سپس سرخ شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی-گراد نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، تاثیر پیش تیمارهای آبیگری اسمزی و مایکروویو در کاهش جذب روغن بیشتر از پیش تیمار اولتراسوند می‌باشد. قابل ذکر است که کاهش جذب روغن در پیش تیمار O1U10M و O1U30M (جدول ۱) در لحظات ۰ تا ۹۰ ثانیه از لحاظ آماری معنی دار نبود اما در لحظات ۹۰ تا ۳۶۰ ثانیه تفاوت معنی داری در کاهش جذب روغن محصول ملاحظه شد؛ ولی در دو پیش تیمار O3U10M و O3U30M در تمامی لحظات سرخ کردن کاهش در جذب روغن نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی دار بود. شکل ۲- (ج، د) و (ه، و)، محتوای تغییرات روغن را در نمونه‌های پیش تیمار شده به صورت مجزا و تلفیقی و سپس سرخ شده به ترتیب در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. روند کاهش محتوای روغن در این نمونه‌ها نیز مشابه نتایج به دست آمده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود؛ با این تفاوت که کمترین میزان جذب روغن در نمونه‌های سرخ شده در دمای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، برای نمونه‌های پیش تیمار شده توسط مایکروویو به دست آمد؛ در حالی که کمترین میزان جذب روغن در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به نمونه‌های پیش تیمار شده با محلول نمک ۳ درصد بود. قابل ذکر است که این میزان کاهش در جذب روغن نیز از لحاظ آماری معنی دار نبود. همچنین، میزان جذب روغن در دو دمای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود. کاهش جذب روغن در پیش تیمارهای O1U10M، O3U10M و O3U30M (جدول ۱) در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی دار بود. در نمونه‌های پیش تیمار شده به صورت مجزا نیز کاهش در جذب روغن نسبت به نمونه شاهد در هر دو دمای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد معنی دار نبود.

مدل سازی جذب روغن

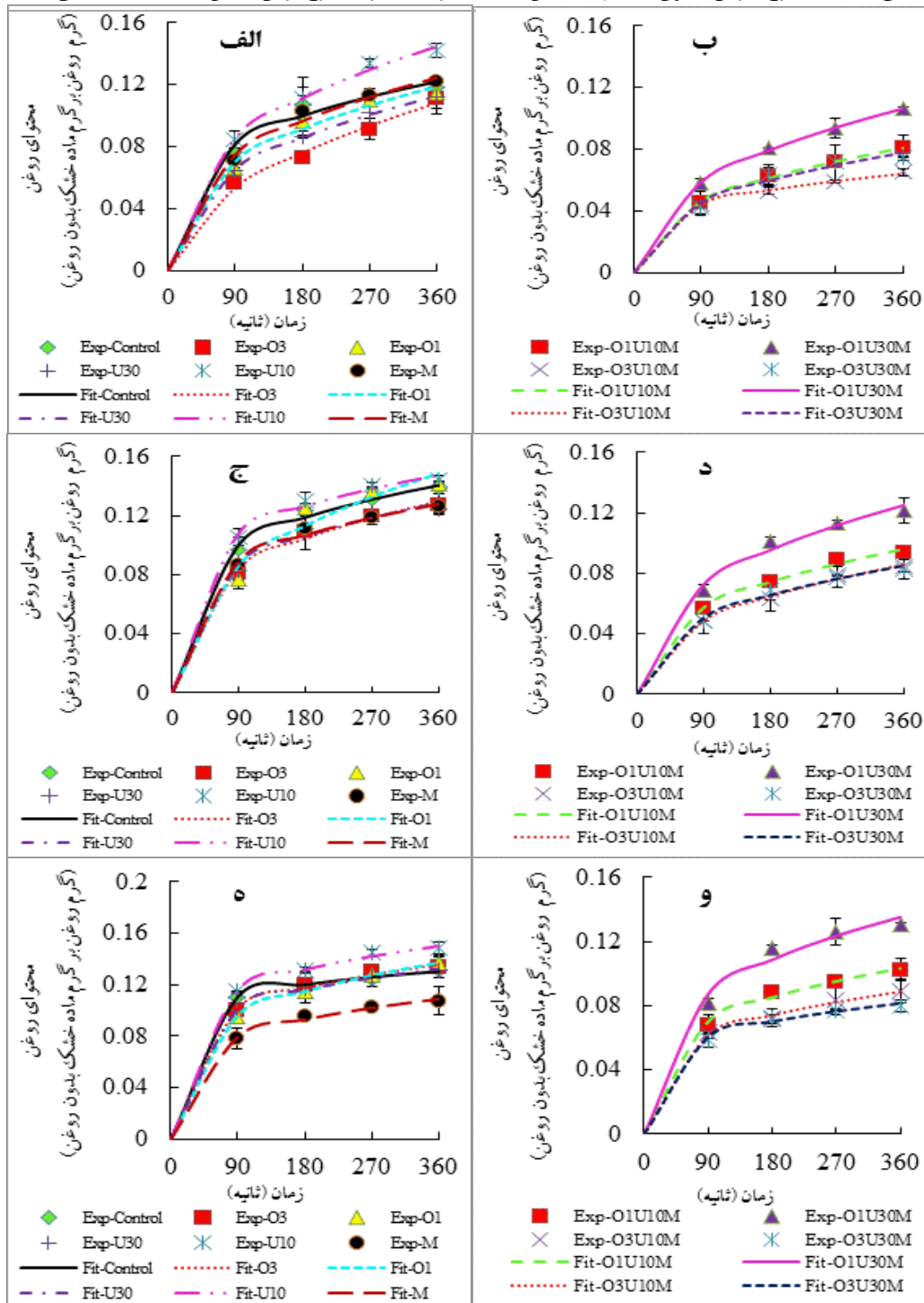
شکل ۲، منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن نمونه‌های مختلف (جدول ۱) را با مدل شماره ۶ جدول ۲ در ۳ دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. این مدل، داده‌های آزمایشی را با میزان R^2 بالا و RMSE پایین برازش نمود (جدول ۳، مدل ۴). همچنین، ۵ مدل دیگر نیز با توجه به جدول ۳، مدل‌های مناسبی برای برازش داده‌های آزمایشی انتخاب شدند. این مدل‌ها به منظور دستیابی به میزان جذب روغن در زمان-

آبیگری اسمزی با محلول نمک ۳ درصد نسبت به پیش تیمارهای دیگر کمترین میزان جذب روغن را دارا می‌باشد و بعد از آن سه پیش تیمار دیگر در تمامی لحظات سرخ کردن تقریباً به یک میزان محتوای روغن را نسبت به نمونه شاهد کاهش دادند. قابل ذکر است که کاهش محتوای روغن در نمونه‌های پیش تیمار شده با مایکروویو به صورت مجزا در مقایسه با نمونه‌های شاهد از لحاظ آماری معنی دار نبود. همچنین هیچگونه اختلاف معنی داری بین نمونه‌های پیش تیمار شده با اولتراسوند با زمان‌های ۱۰ و ۳۰ دقیقه، به ترتیب در افزایش و کاهش جذب روغن و نمونه‌های آبیگری شده با محلول‌های نمک ۱ و ۳ درصد در کاهش جذب روغن ملاحظه نشد.

مطابق شکل ۲- الف، کاهش محتوای روغن در نمونه‌های پیش تیمار شده با اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و زمان ۳۰ دقیقه را می‌توان به تاثیر انقباض و انبساط‌های متوالی و ایجاد پدیده کاونتاسیون و تشکیل حفره در داخل سیب‌زمینی نسبت داد که منجر به تشکیل کانال‌های ریز میکروسکوپی در داخل محصول شده و خروج رطوبت را تسریع می‌کند (Fernandes & Rodrigues, 2007 & Ortuno et al. 2010). بنابراین، موقع سرخ کردن به دلیل خروج بیشتر رطوبت، فشار بخار در داخل سیب‌زمینی زیاد شده و این پدیده مانعی در برابر ورود روغن ایجاد کرده و منجر به کاهش میزان روغن ساختاری نمونه‌ها می‌گردد. در نتیجه بعد از سرخ کردن، روغن ساختاری در کمترین میزان ممکن بوده و بخش عمده روغن سیب-زمینی مربوط به روغن سطحی نفوذ کرده موقع سرد کردن می‌باشد. بر این اساس، کل محتوای روغن نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد. در مورد افزایش میزان جذب روغن در نمونه‌های پیش تیمار شده با اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه مطابق شکل ۲- الف، می‌توان بیان کرد که احتمالاً در مورد این پیش تیمار، مدت زمان لازم برای ایجاد پدیده کاونتاسیون و متعاقب آن، تشکیل کانال‌های ریز میکروسکوپی کم بوده و کانال‌ها به طور کامل تشکیل نمی‌گردند. در رابطه با کاهش جذب روغن در نمونه‌های پیش تیمار شده با مایکروویو نسبت به نمونه شاهد مطابق شکل ۲- الف، می‌توان بیان کرد که این پیش تیمار قبل از سرخ کردن باعث خروج رطوبت از ماده غذایی شده و رطوبت اولیه ماده غذایی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، میزان رطوبت در دسترس برای خروج از ماده غذایی موقع سرخ کردن، کم شده، بنابراین در اثر خروج کمتر رطوبت از محصول، روغن کمتری هم جایگزین آن می‌گردد. این نتیجه منطبق با نتایج محققین دیگر است (Barutcu et al., 2009 & Ngadi et al., 2009 & Oztop et al., 2007 & Tuta et al., 2010). دلیل مشابهی نیز در مورد کاهش جذب روغن در نمونه‌های پیش تیمار شده با فرآیند اسمز نسبت به نمونه شاهد می‌توان ذکر کرد (Moyano et al., 2002). همچنین، هنگام آبیگری اسمزی مقداری مواد جامد محلول وارد ماده غذایی می‌گردد که احتمالاً این مواد موجب کاهش

میزان جذب روغن محصول را تعیین کرده و بر اساس آن مناسب‌ترین فرآیند را برای سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی انتخاب کرد

های غیر از زمان‌های به کار برده شده در این مطالعه قابلیت کاربرد داشته تا بتوان در تمامی لحظات سرخ کردن بدون انجام آزمایش،

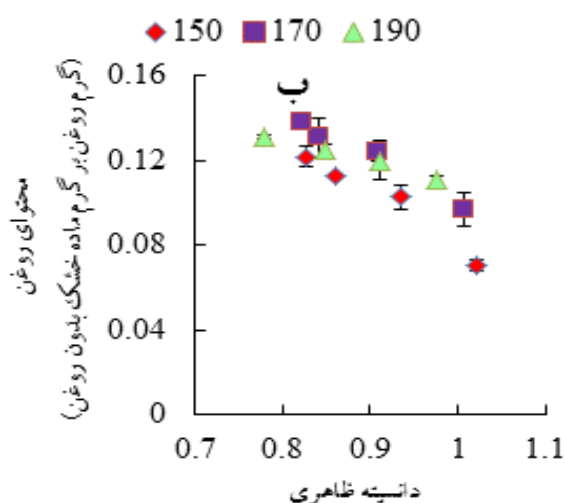
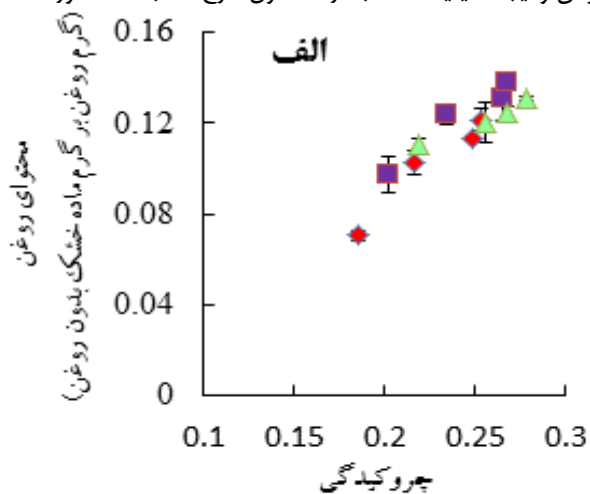


شکل ۲- تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۲ (جدول ۲)، طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان در دماهای ۱۵۰ (الف، ب)، ۱۷۰ (ج، د)، ۱۹۰^oC (ه، و) در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

مساله به این دلیل است که با گذشت زمان سرخ کردن به دلیل خروج رطوبت و کاهش ضخامت محصول و در نتیجه ایجاد چروکیدگی،

همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش میزان چروکیدگی، میزان جذب روغن قطعات سیب‌زمینی افزایش می‌یابد (شکل ۳- الف). این

روغن و ایجاد کیفیت مناسب در محصول سرخ‌شده به دست آورد.



شکل ۳- تغییرات محتوای روغن نمونه‌های شاهد به صورت تابعی از چروکیدگی (الف) و دانسیته ظاهری (ب) طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C

معتبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی

به منظور معتبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی، قطعات سیب‌زمینی ابتدا در داخل حمام اولتراسوند تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۲۰ دقیقه پیش‌تیمار شده و بعد در محلول نمک ۲ درصد به مدت ۳ ساعت قرار گرفته و در نهایت با استفاده از آون مایکروویو با توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه خشک شدند. سپس، نمونه‌ها در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ شدند. نتایج حاصل از برآزش مقادیر جذب روغن آزمایشی با مقادیر جذب روغن پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی ۲ (جدول

میزان جذب روغن محصول بیشتر می‌شود (Moreira et al., 1997). بنابراین، هر چه رطوبت خارج شده از محصول زیاد گردد، به همان اندازه روغن زیادی هم جایگزین آن شده و چروکیدگی محصول هم زیاد خواهد شد؛ به عبارت دیگر، چروکیدگی محصول و جذب روغن با هم ارتباط مستقیم دارند. تا به حال و بر اساس اطلاعات در دسترس، هیچ تحقیقی درباره تاثیر متقابل چروکیدگی و محتوای روغن محصولات سرخ‌شده ارائه نشده است. در این مطالعه، یک مدل درجه دوم نیز برای بررسی اثر متقابل چروکیدگی و جذب روغن پیشنهاد شد:

$$O = as^2 + bs + c \quad (4)$$

که در آن، S، میزان چروکیدگی، O، محتوای روغن محصول و a، b و c ضرایب ثابت مدل می‌باشد (جدول ۴).

علاوه بر این، با گذشت زمان سرخ‌کردن میزان دانسیته ظاهری محصول کاهش و جذب روغن افزایش یافت (شکل ۳-ب). با گذشت زمان سرخ‌کردن به دلیل فشار بخار ایجاد شده در داخل خلل و فرج‌های سیب‌زمینی، حجم آنها افزایش یافته و با افزایش تخلخل محصول و همچنین، کاهش نسبت جرم به حجم محصول، دانسیته ظاهری کم می‌شود (Krokida et al., 2000 & Kawas & Moreira, 2001a). مدل پیشنهادی برای بررسی اثر متقابل دانسیته ظاهری و جذب روغن قطعات سیب‌زمینی نیز داده‌های حاصل از آزمایش را با میزان R^2 بالای ۰/۹۷ و RMSE کمتر از ۰/۰۰۹ برازش نمود:

$$O = ap^2 + bp + c \quad (5)$$

در این معادله p، دانسیته ظاهری، O، محتوای روغن محصول و a، b و c ضرایب ثابت مدل می‌باشد (جدول ۴).

همچنین، یک مدل دیگر نیز برای بررسی اثر متقابل جذب روغن و محتوای رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی پیشنهاد گردید (جدول ۴).

$$O = a(1 - W^b) \quad (6)$$

W: محتوای رطوبت محصول (گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن)

O: محتوای روغن محصول (گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن)

a، b: ضرایب ثابت مدل

علاوه بر این، مدل‌های جدول ۵، رابطه بین ضرایب مدل‌های جذب روغن- زمان، جذب روغن- چروکیدگی، جذب روغن- دانسیته ظاهری، جذب روغن- محتوای رطوبت و همچنین شرایط فرآیند (زمان اعمال پیش‌تیمار اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی نمک، توان مایکروویو و دمای سرخ‌کردن) را نشان می‌دهند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان بدون انجام آزمایشات پرهزینه در تمامی دماها، زمان‌ها و شرایط مختلف فرآیند، محتوای جذب روغن را به دست آورده و مناسب‌ترین شرایط را برای انجام فرآیند با هدف کاهش جذب

۲) در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل، انطباق خوبی بین مقادیر حاصل از مدل و مقادیر حاصل از آزمایش O2U20M (آبگیری اسمزی با محلول نمک ۲ درصد - اولتراسوند با زمان ۲۰ دقیقه - مایکروویو) وجود دارد ($R^2=0/9971$).

جدول ۳- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۱-۶ جدول ۲، برای تیمارها و دماهای مختلف

دما (°C)							مدل ۱
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰			
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	تیمار	
۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹۳۴	Control	
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۸۹	۰/۰۰۹۹	۰/۹۷۹	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۴۹	O3	
۰/۰۰۰۰۲	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹۶۹	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹۲۵	O1	
۰/۰۰۱۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹۴	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹۹۴	U30	
۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹۸۴	U10	
۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹۰۵	M	
۰/۰۰۲۳	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۹	O1U10M	
۰/۰۰۵۷	۰/۹۹۱۵	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹۳۵	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۹۴	O1U30M	
۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹۸۳	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۹۲	O3U10M	
۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۷۵	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹۰۰	O3U30M	
مدل ۲							
۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹۶۸	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹۳۳	Control	
۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۸۸	۰/۰۱۰۰	۰/۹۷۸۷	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۵	O3	
۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۶۷	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹۲۳	O1	
۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹۳۸	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹۹۴	U30	
۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹۸۳	U10	
۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۲۸	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹۰۳	M	
۰/۰۰۲۳	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۹	O1U10M	
۰/۰۰۵۸	۰/۹۹۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹۳۳	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹۹۴	O1U30M	
۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹۸۳	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۹۳	O3U10M	
۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۷۳	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹۶	۰/۰۰۳۶	۰/۹۸۹۸	O3U30M	
مدل ۳							
۰/۰۰۳۷	۰/۹۹۶۵	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۲۵	۰/۹۹۷۹	Control	
۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۶۹	۰/۹۸۹۸	۰/۰۰۵۸	۰/۹۸۵۹	O3	
۰/۰۰۲۸	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹۸	O1	
۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۱۷	۰/۹۹۸۸	U30	
۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۸۲	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۷۹	U10	
۰/۰۰۲۳	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۶۳	M	
۰/۰۰۲۳	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۵۴	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹۰۵	O1U10M	
۰/۰۰۳۲	۰/۹۹۷۳	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹۶۹	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹۷	O1U30M	
۰/۰۰۳۷	۰/۹۹۱۹	۰/۰۰۳۹	۰/۹۸۹۸	۰/۰۰۵۲	۰/۹۶۸۹	O3U10M	
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۴۲	۰/۰۰۴۴	۰/۹۸۴۵	O3U30M	
مدل ۴							
۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹۵	Control	
۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۹۰	۰/۹۸۲۸	۰/۰۰۴۳	۰/۹۹۱۹	O3	
۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۲۸	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹۴۴	O1	
۰/۰۰۱۲	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۹۸	U30	
۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۳۱	۰/۹۹۸	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹۸۸	U10	

./۰۰۱۶	./۹۹۸۹	./۰۰۲۴	./۹۹۸۳	./۰۰۵۱	./۹۹۱۷	M
./۰۰۲۱	./۹۹۸۱	./۰۰۱۶	./۹۹۸۷	./۰۰۰۹	./۹۹۹۴	O1U10M
./۰۰۵۲	./۹۹۹۳	./۰۰۳۹	./۹۹۵۳	./۰۰۰۹	./۹۹۹۶	O1U30M
./۰۰۲۰	./۹۹۷۶	./۰۰۱۵	./۹۹۸۳	./۰۰۰۹	./۹۹۹۹	O3U10M
./۰۰۱۸	./۹۹۷۷	./۰۰۲۰	./۹۹۷۳	./۰۰۳۲	./۹۹۱۹	O3U30M
مدل ۵						
./۰۰۲۰	./۹۹۹۹	./۰۰۱۶	./۹۹۹۴	./۰۰۲۲	./۹۹۸۵	Control
./۰۰۰۶	./۹۹۹۹	./۰۰۶۸	./۹۹۰۱	./۰۰۵۷	./۹۸۶۳	O3
./۰۰۲۵	./۹۹۸۴	./۰۰۱۰	./۹۹۹۷	./۰۰۲۲	./۹۹۸۴	O1
./۰۰۰۸	./۹۹۹۸	./۰۰۲۱	./۹۹۸۷	./۰۰۱۵	./۹۹۹۱	U30
./۰۰۲۰	./۹۹۹۱	./۰۰۰۹	./۹۹۹۸	./۰۰۲۷	./۹۹۸۲	U10
./۰۰۰۳	./۹۹۹۹	./۰۰۱۱	./۹۹۹۶	./۰۰۳۲	./۹۹۶۷	M
./۰۰۱۳	./۹۹۹۲	./۰۰۱۳	./۹۹۹۱	./۰۰۱۲	./۹۹۸۸	O1U10M
./۰۰۳۰	./۹۹۷۶	./۰۰۲۱	./۹۹۸۶	./۰۰۱۷	./۹۹۸۶	O1U30M
./۰۰۳۲	./۹۹۴	./۰۰۲۲	./۹۹۶۷	./۰۰۱۹	./۹۹۵۶	O3U10M
./۰۰۰۵	./۹۹۹۸	./۰۰۰۶	./۹۹۹۷	./۰۰۱۹	./۹۹۷۱	O3U30M
مدل ۶						
./۰۰۳۸	./۹۹۶۴	./۰۰۲۲	./۹۹۸۹	./۰۰۱۳	./۹۹۹۴	Control
./۰۰۲۷	./۹۹۸۱	./۰۰۴۷	./۹۹۵۱	./۰۰۶۷	./۹۸۱۱	O3
./۰۰۵۰	./۹۹۳۷	./۰۰۱۸	./۹۹۹۱	./۰۰۰۴	./۹۹۹۹	O1
./۰۰۳۱	./۹۹۷۵	./۰۰۰۲	./۹۹۹۹	./۰۰۳۰	./۹۹۶۴	U30
./۰۰۴۳	./۹۹۶۲	./۰۰۱۹	./۹۹۹۲	./۰۰۴۳	./۹۹۵۷	U10
./۰۰۲۰	./۹۹۸۳	./۰۰۲۴	./۹۹۸۳	./۰۰۱۵	./۹۹۹۳	M
./۰۰۲۳	./۹۹۷۶	./۰۰۲۳	./۹۹۷۲	./۰۰۲۲	./۹۹۶۲	O1U10M
./۰۰۰۸	./۹۹۹۸	./۰۰۱۲	./۹۹۹۶	./۰۰۳۰	./۹۹۵۹	O1U30M
./۰۰۴۷	./۹۸۶۸	./۰۰۳۱	./۹۹۳۵	./۰۰۳۱	./۹۸۸۸	O3U10M
./۰۰۰۹	./۹۹۹۴	./۰۰۰۷	./۹۹۹۶	./۰۰۰۷	./۹۹۹۵	O3U30M

جدول ۴- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های جذب روغن به صورت تابعی از چروکیدگی (مدل ۱)، دانسیته ظاهری (مدل ۲) و محتوای رطوبت (مدل ۳) برای تیمارها و دماهای مختلف

دما (°C)						مدل ۱
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	تیمار
./۰۰۲۴	./۹۹۹۰	./۰۰۵۸	./۹۹۹۴	./۰۰۷۰	./۹۸۹۹	Control
./۰۰۳۷	./۹۹۷۷	./۰۱۲۰	./۹۷۹۵	./۰۰۵۸	./۹۹۰۳	O3
./۰۰۲۲	./۹۹۹۲	./۰۰۳۰	./۹۹۸۳	./۰۰۸۳	./۹۸۴۵	O1
./۰۰۲۸	./۹۹۸۶	./۰۰۶۵	./۹۹۲۰	./۰۰۲۲	./۹۹۸۷	U30
./۰۰۵۳	./۹۹۶۳	./۰۰۵۵	./۹۹۵۷	./۰۰۶۵	./۹۹۳۵	U10
./۰۰۱۹	./۹۹۹۰	./۰۰۳۹	./۹۹۷۰	./۰۰۴۳	./۹۹۶۱	M
./۰۰۴۶	./۹۹۳۷	./۰۰۵۳	./۹۹۰۳	./۰۱۵۴	./۸۸۳۳	O1U10M
./۰۰۳۸	./۹۹۷۵	./۰۰۷۸	./۹۸۷۶	./۰۱۱۱	./۹۶۴۷	O1U30M
./۰۰۹۱	./۹۶۷۴	./۰۰۸۸	./۹۶۵۴	./۰۰۵۵	./۹۷۶۶	O3U10M
./۰۰۲۱	./۹۹۷۹	./۰۰۴۱	./۹۹۲۳	./۰۰۲۱	./۹۹۷۶	O3U30M
مدل ۲						

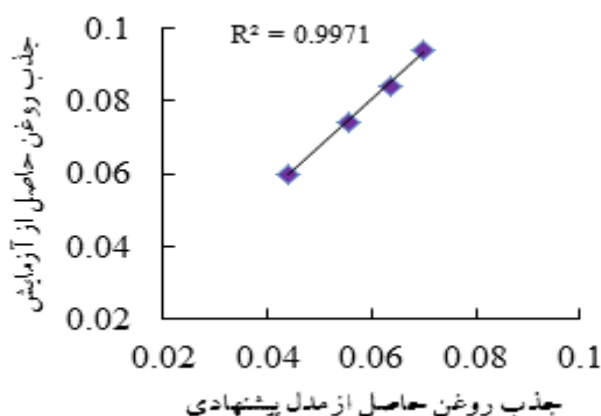
۰/۰۲۰۷	۰/۹۲۹۰	۰/۰۲۳۵	۰/۹۱۴۳	۰/۰۱۹۹	۰/۹۱۹۲	Control
۰/۰۰۵۶	۰/۹۹۴۸	۰/۰۱۹۰	۰/۹۴۸۸	۰/۰۰۹۴	۰/۹۷۵۱	O3
۰/۰۱۰۷	۰/۹۸۱۰	۰/۰۰۹۷	۰/۹۸۲۳	۰/۰۰۶۱	۰/۹۹۱۶	O1
۰/۰۲۹۲	۰/۸۵۵۵	۰/۰۲۰۲	۰/۹۲۳۷	۰/۰۲۹۸	۰/۷۷۴۴	U30
۰/۰۳۴۵	۰/۸۴۲۸	۰/۰۲۹۱	۰/۸۸۲۰	۰/۰۳۴۱	۰/۸۲۱۶	U10
۰/۰۰۵۲	۰/۹۹۲۹	۰/۰۰۵۹	۰/۹۹۳۳	۰/۰۱۱۰	۰/۹۷۴۷	M
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۵۰	۰/۹۸۷۲	O1U10M
۰/۰۰۳۶	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۸۶	۰/۹۸۴۸	۰/۰۰۶۶	۰/۹۸۷۵	O1U30M
۰/۰۰۲۵	۰/۹۹۷۵	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۵۸	۰/۰۰۳۹	۰/۹۸۸۲	O3U10M
۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۴۶	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹۲۹	۰/۰۰۴۵	۰/۹۸۹۳	O3U30M
مدل ۳						
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۹۰	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹۴۸	Control
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۸۹	۰/۰۰۹۱	۰/۹۸۲۳	۰/۰۰۸۷	۰/۹۶۸۰	O3
۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹۵۱	O1
۰/۰۰۱۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۱۷	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹۸۹	U30
۰/۰۰۵۳	۰/۹۹۴۳	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۹۶	۰/۹۷۸۶	U10
۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۸۵	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹۹۴	M
۰/۰۰۲۴	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۸۹	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹۴۳	O1U10M
۰/۰۰۲۸	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹۹۲	O1U30M
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۷۳	۰/۰۰۶۸	۰/۹۶۹۵	۰/۰۰۲۸	۰/۹۹۰۷	O3U10M
۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۴۱	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۹	O3U30M

جدول ۵- مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها، به صورت تابعی از دمای سرخ‌کردن و دیگر پارامترهای مربوطه

R^2	$O = \frac{at^b}{1+t}$
۰/۹۳۶۰	$a = -0.16770 - 0.0014U - 0.0017T + 0.04134O^T + 2/93E - 7U^T - 0.0024M^T + 2/17E - 6T^T$
۰/۹۹۸۷	$b = -0.1165810 - 5/9E - 5U + 0.18816T - 0.3069O^T + 2/81E - 5U^T - 0.0037M^T - 6/7E - 5T^T$
R^2	$O = at^b$
۰/۸۹۷۹	$a = -0.0026T - 9/6E - 5OU - 1/2E - 5MT + 2/47E - 6T^T$
۰/۹۶۷۱	$b = 0.07525T + 0.00217OU + 2/94E - 5MT - 3/4E - 5T^T$
R^2	$O = \frac{1+t}{at+b}$
۰/۹۵۳۳	$a = -0.739659O + 0.11525U + 0.475995M + 0.32439T$
۰/۹۳۱۸	$b = 15/41328T + 1/429482OU + 0.8865MT - 0.7242T^T$
R^2	$O = \exp(-at^b)$
۰/۹۸۲۵	$a = 0.99905T + 0.04948OU + 0.00395MT - 0.0043T^T$
۰/۹۶۶۳	$b = -0.0296T + 7/71E - 5OU - 3/1E - 5MT + 1/27E - 5T^T$
R^2	$O = \frac{abt}{1+bt}$
۰/۹۶۷۴	$a = -0.0482O + 1/42E - 5U - 0.0621M + 0.00945T$
۰/۸۸۱۶	$b = -0.0012T - 3/8E - 6OU - 4/9E - 6MT + 1/35E - 6T^T$
R^2	$O = a.(1 - \exp(-bt))$
۰/۹۸۰۲	$a = -0.0588O - 7E - 5U - 0.0521M + 0.00796T$
۰/۹۵۹۴	$b = -0.0073O - 3/8E - 5U - 0.0015M + 7/82E - 5T^T$
R^2	$O = aS^2 + bS + c$

۰/۹۴۵۲	$a = ۱۳۸/۸۸۸۷O + ۹/۰۰۱۴U + ۳/۸۵۵۴T - ۴۳/۶۰۳۱O^۲ - ۰/۳۸۱۰U^۲ - ۱۰/۴۹۷۳ M^۲ - ۰/۰۱۳۳T^۲$
۰/۸۰۵۴	$b = -۶/۰۴۵۵۰O - ۰/۰۴۴U - ۰/۰۱۹۲T + ۲/۲۲۹۹O^۲ + ۰/۰۱۳۱U^۲ + ۰/۰۲۳۸ M^۲ + ۰/۰۰۰۰۶T^۲$
۰/۹۴۸۱	$c = ۱۱۷/۲۲۱۹O + ۲۱/۳۱۷۱U + ۷/۰۶۲۲T - ۲۸/۲۲۷۶O^۲ - ۰/۰۹۵U^۲ - ۲۱/۱۷۵۹ M^۲ - ۰/۰۲۰۹T^۲$
R^2	$O = a\rho^2 + b\rho + c$
۰/۹۵۰۱	$a = ۱/۵۴۹۴O - ۰/۰۷۰۳U - ۰/۰۵۷۲T - ۰/۳۱۸۲O^۲ + ۰/۰۰۲۰U^۲ + ۰/۰۹۹۹ M^۲ + ۰/۰۰۰۲T^۲$
۰/۹۴۷۸	$b = -۲/۵۹۳۰O + ۰/۱۶۹۶U + ۰/۰۱۲T + ۰/۵۲۹۱O^۲ - ۰/۰۰۴۷U^۲ - ۰/۱۹۹۷ M^۲ - ۰/۰۰۰۳T^۲$
۰/۹۳۹۱	$c = ۱/۰۹۷۰O - ۰/۰۹۳۱U - ۰/۰۴۳۶T - ۰/۲۲۵۴O^۲ + ۰/۰۰۲۵U^۲ + ۰/۰۹۳۴ M^۲ + ۰/۰۰۰۱T^۲$
R^2	$O = a(1 - W^b)$
۰/۹۷۷۳	$a = -۰/۰۰۴۶O + ۰/۰۰۰۱U - ۰/۰۰۶۱M + ۰/۰۰۰۸T$
۰/۸۶۴۹	$b = -۰/۰۷۰۲۷T - ۰/۰۱۵۶U + ۰/۱۷۵۲M + ۰/۰۲۵۷T^۲$

T, M, U, O به ترتیب نشان‌دهنده غلظت محلول اسمزی نمک، زمان پیش‌تیمار اولتراسوند، توان پیش‌تیمار مایکروویو و دمای سرخ‌کردن می‌باشد.



شکل ۴- برازش داده‌های جذب روغن حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل پیشنهادی (مدل ۲، جدول ۲)

نتیجه‌گیری

از زمان‌های مختلف تعیین کرد و کیفیت محصول سرخ‌شده را از نقطه نظر کاهش میزان جذب روغن افزایش داد. در نهایت، مدل‌هایی با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره برای تعیین ضرایب مدل‌های جذب روغن به دست آمدند که می‌توانند برای محاسبه میزان جذب روغن در شرایط مختلف فرآیند سرخ‌کردن به کار روند.

تلفیق پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی با محلول نمک، میزان جذب روغن را در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده به صورت معنی‌داری کاهش داد. در این مطالعه مدل‌های معتبرسازی شده مختلفی با R^2 بالا و RMSE پایین به دست آمدند که به راحتی می‌توان با استفاده از این مدل‌ها میزان جذب روغن را به صورت تابعی

منابع

- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists., Washington, DC.
- AOAC. 1995. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists., Washington, DC.
- Barutcu, I., Sahin, S., and Sumnu, G., 2009. Acrylamide formation in different batter formulations during microwave frying. LWT - Food Science and Technology. 42, 17-22.
- Blumenthal, M.M., 1991. A new look at the chemistry and physics of deep fat frying. Food Technology. 45, 68-71.
- Bouchon, P., Aguilera, J., and Pyle, D., 2003. Structure Oil-Absorption Relationships during Deep-Fat Frying. Journal of Food Science and Technology. 68(9), 2711-2716.
- Bouchon, P., and Aguilera, J.M., 2001. Microstructural analysis of frying of potatoes. Journal of Food Science and Technology. 36, 669-676.
- Eren, I., and Kaymak-Ertekin, F., 2007. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. Journal of Food Engineering. 79, 344-352.

- Fernandes, A.N., and Rodrigues, S., 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*. 82, 261-267.
- Franco, P., Pedro, M., Natalie, S., and Romina, P., 2007. Physical properties of pre-treated potato chips. *Journal of Food Engineering*. 79, 1474-1482.
- Freitas, D.D.C., Berbari, S.A.G., Prati, P., Fakhouri, F.M., Queiroz, F.P.C., and Vicente, E., 2009. Reducing of fat uptake in cassava product during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*. 94, 390-394.
- Gamble, M.H., Rice, P., and Selman, J.D., 1987a. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. Tubers. *International Journal of Food Science of Technology*. 22, 233-241.
- Ikoko, J., and Kuri, V., 2007. Osmotic pretreatment effect on fat intake reduction on eating quality of deep fried plantain. *Journal of Food Chemistry*. 102, 523-531.
- Kawas, M.L., and Moreira, R.G., 2001a. Characterisation of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering*. 47, 97-107.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z. B., 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*. 44(1), 39-46.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z.B., 2000. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering*. 43, 147-154.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B., and Marinou-Kouris, D., 2001. Effect of osmotic dehydration pretreatment on quality of french fries. *Journal of Food Engineering*. 49, 339-345.
- Marisol, D., Franco, P., Pedro, M., and Elizabeth, T., 2007. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*. 81, 257-265.
- Moreira, R.G., Sun, X., and Chen, Y., 1997. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*. 31, 485-498.
- Moyano, P.C., and Pedreschi, F., 2006. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT - Food Science and Technology*. 39(3), 285-291.
- Moyano, P.C., Rioseco, V.K., and Gonzalez, P. A., 2002. Kinetics of crust color changes during deep fat frying of impregnated french fries. *Journal of Food Engineering*. 54, 249-255.
- Ngadi, M.O., Wang, Y., Adedeji, A.A., and Raghavan, G.S.V., 2009. Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *LWT - Food Science and Technology*. 42, 438-440.
- Ortuno, C., Munuera, I.P., Puig, A., Riera, E., and Perez, J.V.G., 2010. Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. *Journal of Physics Procedia*. 3, 153-159.
- Oztop, M.H., Shin, S., and Sumnu, G., 2007. Optimization of microwave frying of potato slices by using taguchi technique. *Journal of Food Engineering*. 79, 83-91.
- Pedreschi, F., and Aguilera, J.M., 2002. Some changes in potato chips during frying observed by confocal laser scanning microscopy. *Journal of Food Science and Technology*. 7, 1-5.
- Pedreschi, F., Cocio, C., Moyano, P., and Troncoso, E., 2008. Oil in potato slices during frying. *Journal of Food Engineering*. 87, 200-212.
- Steel, R.G.D., Torrie, J.H., and Dickey, D.A., 1997. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: Mc Graw-Hill.
- Sukumar, D.A., Rastogi, B.N.K., Gopala Krishna, A.G., and Lokesh, B.R., 2009. Oil partitioning between surface and structure of deep-fat fried potato slices: A kinetic study. *LWT - Food Science and Technology*. 42, 1054-1058.
- Tuta, S., Koray Palazoglu, T., and Gokmen, V., 2010. Effect of microwave pre-thawing of frozen potato strips on akrilamide level and quality of french fries. *Journal of Food Engineering*. 97, 261-266.
- Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., and Raoult-Wack, A.L., 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.
- Ziaifar, A.M., Courtois, F., and Trystram, G., 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*. 33(2), 191-212.

Modeling oil uptake of potato strips pretreated with ultrasound, microwave and osmotic dehydration during deep-fat frying process

M. Barmour¹ - J. Deghannya^{2*} - B. Ghanbarzadeh³

Received: 14-07-2013

Accepted: 16-04-2014

Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of process conditions and different pretreatments including ultrasound, microwave and osmotic dehydration on mass transfer and oil uptake during deep fat frying of potato slices. Ultrasound pretreatment was performed at frequency of 40 KHz for 10 and 30 minutes, microwave pretreatment was conducted at 5 W/g power and osmotic dehydration pretreatment was done in NaCl solutions with concentrations of 1 and 3 percent. Potato slices were then fried at 150, 170 and 190°C for 90, 180, 270 and 360 seconds. The results showed that ultrasound pretreatment for 10 minutes increases oil uptake of samples as compared with control sample, but when samples were exposed to ultrasound for 30 minutes, oil uptake was decreased. In addition, microwave pretreatment reduced oil uptake of potato slices insignificantly. Furthermore, osmotic dehydration pretreatment reduced oil uptake. In order to model oil uptake, experimental data were fitted with 6 models. The aforementioned models had the highest R² and a minimum value of RMSE.

Keywords: Ultrasound, Microwave, Osmotic dehydration, Frying, Oil uptake, Effective moisture diffusion coefficient.

1, 2 and 3. Former M. Sc. Student, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran, Respectively.

(* - Corresponding Author Email : J_deghannya@tabrizu.ac.ir)