نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۱، شماره ۵، آذر- دی ۱۳۹۴، ص. ۶۰۷-۵۹۸

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 11, No. 5, Dec- Jan 2015, p. 597-607

بررسی تغییرات محتوای رطوبت و جذب روغن به‌همراه مدل‌سازی آن‌ها در قطعات سیب‌زمینی رقم ساتینا طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق

فاطمه روشنی[۱]، سارا موحد [۲*] ، حسین احمدی چناربن[۳]

تاریخ دریافت ۱۳۹۲/۱۰/۲۴
تاریخ پذیرش۱۳۹۳/۱۰/۱۴

چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر پیش‌تیمارهای اولتراسوند و خشک‌کردن، بر محتوای رطوبت و میزان جذب روغن قطعات سیب‌زمینی رقم ساتینا، طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌تیمار اولتراسوند در دو فرکانس ۲۰ و ۴۰ کیلوهرتز، به مدت ۱۵ دقیقه و پیش‌تیمار خشک‌کردن دردمای ۶۰ درجه سلسیوس و به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. پس از آن قطعات سیب‌زمینی در دماهای ۱۷۰ و۱۹۰ درجه سلسیوس و به مدت ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه سرخ شدند. با توجه به نتایج، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند، در فرکانس۴۰ کیلوهرتز ، در دما و زمان یکسان، از محتوای رطوبتی کمتری برخوردار بودند. قابل توجه این‌که با افزایش دمای سرخ‌کردن و فرکانس، ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش و محدوده‌ی آن m^2/s $-8/80\times10^{-8}$ $6/95\times10^{-8}$ محاسبه شد (R^2=۰/۹۹). از سوی دیگر با افزایش فرکانس، انرژی فعال‌سازی افزایش و محدوده‌ی آن kJ/mol ۱۶/۳۰۷-۱۳/۱۶۱ تعیین گردید (R^2=۰/۹۹). همچنین در زمان‌های سرخ کردن یکسان، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند، در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، از بیشترین میزان جذب روغن برخوردار بودند. بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره، مدل نمایی بهترین برازش را به‌منظور بررسی تغییرات محتوای رطوبت و روغن نمونه‌ها نشان داد.

واژه‌های کلیدی: اولتراسوند، سرخ‌کردن عمیق، سیب‌زمینی، محتوای رطوبت، جذب روغن، مدل‌سازی.

مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی سولانوم توبروزوم (*Solanum tuberosum*)، گیاهی است از خانواده سیب‌زمینیان (Solanacea) که برای استفاده از غده زیرزمینی آن کشت می‌گردد و با تولید سالانه بیش از ۳۰۰ میلیون تن در دنیا، پس از گندم، ذرت و برنج از مهم‌ترین محصولات کشاورزی محسوب می‌شود (Duran *et al.*, 2007). براساس آمار فائو، مقدار تولید سیب‌زمینی در ایران، در سال ۲۰۱۱، ۴/۵ میلیون تن بوده و از این نظر، رتبه چهاردهم جهان را به خود اختصاص داده است (Anouymous, 2011). سیب‌زمینی به صورت خام یا فرآیند شده مصرف می‌گردد و مهم‌ترین فرآورده‌های سرخ شده آن شامل چیپس و خلال سرخ شده می‌باشد (Lisinska & Leszczynski, 1998). سرخ‌کردن عمیق در روغن، به عنوان یکی از معمول‌ترین عملیات واحد مورد استفاده در تهیه مواد غذایی فرآیند شده تعریف می‌شود. در واقع سرخ کردن عمیق یک فرآیند انتقال حرارت و جرم به صورت همزمان است که در آن انتقال حرارت از طریق ترکیبی از روش‌های جابجایی و هدایت صورت می‌گیرد. همچنین با به‌کارگیری دماهای بالا، قسمت اعظم آب ماده غذایی به شکل بخار از آن خارج شده و روغن توسط ماده غذایی جذب می‌شود (Gazmuri & Bouchon, 2009). جذب روغن تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند دمای روغن، مدت زمان سرخ کردن، اندازه و شکل محصول، پیش تیمارها و ترکیب ماده غذایی (میزان رطوبت و مواد جامد اولیه) قرارمی‌گیرد (Dana & Saguy, 2006). یکی از پارامترهای مهم که جذب روغن توسط ماده غذایی در حین سرخ کردن را تحت تاثیر قرار می‌دهد، محتوای رطوبت مواد جامد اولیه است. بنابراین استفاده از پیش تیمارهایی که محتوای آب اولیه محصول را کاهش دهد سبب بهبود خصوصیات کیفی محصول سرخ شده خواهند شد. پیش تیمار خشک‌کردن قبل از سرخ کردن، از طریق

۱و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد و دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد ورامین- پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران.
۳- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد ورامین- پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: movahed@iauvaramin.ac.ir)

کاهش محتوای آب آزاد اولیه ماده غذایی و همچنین با ایجاد یک ماتریکس سطحی سفت و خشک در اطراف ماده غذایی سبب کاهش زمان فرآیند سرخ کردن و در نتیجه کاهش جذب روغن توسط ماده غذایی می‌گردد. علاوه بر پیش تیمار خشک‌کردن، استفاده از اولتراسوند نیز قبل از سرخ کردن عمیق می‌تواند مورد توجه قرارگیرد. طی عمل سونیکاسیون، امواج صوتی طولی به محیط مایع برخورد کرده و سبب ایجاد کاویتاسیون می‌گردد. کاویتاسیون باعث ایجاد انقباض و انبساط های پی در پی در ماده غذایی و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و در نتیجه سبب سهولت خروج آب از داخل محصول از طریق این کانال‌ها می‌شود(Ziaiifar *et al.*, 2008). بر اساس نتایج تحقیقات، استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند، با افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت و افزایش سرعت انتشار مولکولهای آب، سبب کاهش زمان سرخ کردن و بهبود خصوصیات کیفی محصول سرخ شده می گردد (Fernandes *et al.*,2009). Bravo و همکاران (۲۰۰۹) مدل سازی ازدست دادن آب برای ورقه‌های سیب‌زمینی را حین سرخ کردن عمیق مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج، با افزایش دما، ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت و محدوده‌ی آن m^2/s ۹- ۱۰×۱۷/۷۱ – ۹-۱۰×۱۰/۷ محاسبه شد. Krokida و همکاران (۲۰۰۰) تاثیر شرایط سرخ‌کردن (دمای روغن و ضخامت نمونه) را بر خصوصیات ساختاری (دانسیته ظاهری و دانسیته واقعی) قطعات سیب زمینی بررسی نمودند. ابتدا قطعات سیب‌زمینی با ابعاد ۴cm×۰/۵×۰/۵ cm، ۴cm×۱×۱ و ۴cm×۱/۵×۱/۵ در آب داغ با دمای ۷۰°C به مدت ۱۰ دقیقه آنزیم بری و سپس در دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به مدت ۰/۳، ۰/۶، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۵ و ۲۰ دقیقه سرخ شدند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان سرخ کردن، دانسیته واقعی قطعات سیب زمینی سرخ شده به دلیل پدیده انتقال جرم افزایش می‌یابد و با افزایش دمای روغن، دانسیته واقعی به دلیل جذب روغن و از دست دادن آب، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت نمونه، دانسیته واقعی افزایش یافت. از طرف دیگر، دانسیته ظاهری با افزایش مدت زمان سرخ کردن، به دلیل تبخیر آب، ایجاد منافذ حاوی هوا و جذب روغن، کاهش یافت. همچنین دانسیته ظاهری، با افزایش دمای روغن، به دلیل تشدید در پدیده انتقال جرم، کاهش و با افزایش ضخامت نمونه، افزایش یافت. Pedreschi و Moyano (۲۰۰۵) اثر پیش‌تیمار خشک کردن را بر جذب روغن در چیپس‌های سیب‌زمینی (ضخامت ۲/۵mm و قطر ۳۷ mm) بررسی نمودند. ابتدا نمونه‌ها در آب داغ در دمای ۸۵°C به مدت ۳/۵ دقیقه آنزیم بری شدند. نمونه‌های آنزیم‌بری شده به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شدند. سپس برخی از نمونه‌های آنزیم‌بری شده در یک آون با جریان هوای کنوکسیونی در دمای ۶۰°C و سرعت جریان هوای ۱ m/s تا رسیدن به محتوای رطوبت نهایی ۶۰٪ (بر اساس وزن مرطوب) خشک شدند(نمونه‌های آنزیم‌بری و خشک شده). در پایان، نمونه‌ها در دمای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰°C تا رسیدن به محتوای رطوبت ۱/۸٪ (بر اساس وزن مرطوب) سرخ شدند. نتایج نشان داد که پیش‌تیمار خشک کردن، به طور قابل توجهی محتوای روغن در ورقه‌های سیب‌زمینی آنزیم-بری شده را بعد از سرخ کردن کاهش می‌دهد. در واقع نمونه‌های آنزیم بری و خشک شده نسبت به نمونه‌های تنها آنزیم‌بری شده، جذب روغن کمتری را در حین سرخ کردن از خود نشان دادند.

هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر پیش تیمارهای اولتراسوند و خشک‌کردن بر محتوای رطوبت، جذب روغن، انرژی فعال‌سازی و ضریب انتشار موثر رطوبت در قطعات سیب‌زمینی، حین فرآیند سرخ‌کردن عمیق بود.

مواد و روش‌ها

مواد

سیب‌زمینی واریته ساتینا، از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهیه و در دمای محیط نگهداری شد. به‌منظور سرخ‌کردن، از روغن گیاهی مخصوص سرخ کردنی بهار که مخلوطی از روغن پنبه‌دانه، آفتابگردان و سویا بود، استفاده گردید. در این تحقیق جهت خلال‌کردن نمونه‌های سیب‌زمینی، از خلال کن خانگی Genius ساخت آلمان، به‌منظور انجام پیش‌تیمارهای خشک‌کردن و اولتراسوند به‌ترتیب از خشک‌کن سینی‌دار مدل Shimaz/SH-S55 ساخت ایران و اولتراسوند مجهز به سیستم تنظیم فرکانس (این دستگاه قادر به ایجاد دو سطح فرکانس، ۲۰ و ۴۰ کیلو هرتز بود) و زمان سونیکاسیون، مدل Wise Clean/WUC-D10 ساخت ژاپن، به‌منظور سرخ‌کردن، از سرخ‌کن مجهز به سیستم تنظیم دما و زمان، مدل Moulinex، ساخت فرانسه و به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها از آون Shimaz/TPS6777، ساخت ایران استفاده شد.

روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها: برای انجام آزمایش، سیب‌زمینی‌ها پس از شستشو و پوست‌گیری، توسط خلال‌کن خانگی به ابعاد ۴×۱/۲×۱/۲ سانتی‌متر برش داده‌شدند. به منظور جلوگیری از واکنش قهوه‌ای شدن، نمونه‌ها در آب داغ در دمای ۸۵°C و به مدت ۳/۵ دقیقه قرار گرفتند. آن‌گاه نمونه‌ها درون ظرف شیشه‌ای قرار داده شدند و قبل از سرخ کردن، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شسته شدند و آب اضافی سطحی توسط یک کاغذ رطوبت‌گیر گرفته‌شد. نمونه‌ها جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در دستگاه حمام فراصوت، تحت فرکانس‌های۲۰ و ۴۰ کیلوهرتز در مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و سپس جهت انجام پیش‌تیمار خشک کردن، در دستگاه خشک‌کن سینی‌دار، در دمای ۶۰°C و به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شدند.

فرآیند سرخ‌کردن: بمنظور سرخ‌کردن نمونه‌ها، ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن مورد نظر، روی حالت اتوماتیک قرار داده شد. پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای موردنظر، سبد حاوی نمونه‌ها در روغن غوطه‌ور گردید. نمونه‌های پیش‌تیمار شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰°C و به مدت ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه سرخ شدند. پس از سرخ شدن نمونه‌ها در مدت زمان موردنظر، از سرخ‌کن خارج و بر روی سینی مشبک قرار گرفتند تا روغن اضافی خلال‌ها گرفته شد. آن‌گاه محتوای روغن و رطوبت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تیمارهای مورد استفاده در تحقیق در جدول ۱ ارایه شده است.

اندازه‌گیری محتوای رطوبت: محتوای رطوبت نمونه‌ها با خشک‌کردن آن‌ها در یک آون کنوکسیونی تا رسیدن به وزن ثابت، در دمای ۱۰۵°C تعیین شد (Anonymous, 1995).

مدل‌سازی محتوای رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق: برای مدل‌سازی محتوای رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، از ۷ مدل تجربی مطابق جدول ۲ استفاده شد که در آن‌ها b, t, x, L, c, a, n, m ضرایب مدل‌ها می‌باشند.

در فرآیند مدل‌سازی، برای برازش داده‌ها از روش رگرسیون غیرخطی استفاده گردید و مدل های مذکور با داده‌ها برآزش شدند. برای تعیین مناسب بودن برازش، علاوه بر ضریب تعیین R^2 ، از سه شاخص دیگر به شرح جدول ۳ استفاده شد. که در آن‌ها: M_i: مقدار رطوبت محصول، M_{pre}: مقدار رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل، N: تعداد مشاهدات، n: تعداد ثابت‌های مدل، MR_{exp}: نسبت رطوبت داده‌های آزمایشی و MR_{pre}: نسبت رطوبت پیش‌بینی شده می‌باشند. حال هر چه مقدار R^2 بیشتر ومقادیر شاخص های دیگر کمتر باشد، نشان دهنده‌ی برآزش بهتر آن مدل می‌باشد.

جدول ۱- تیمارهای به‌کار رفته در تحقیق

کد تیمار	تیمارهای تحقیق
P_1	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°C به مدت ۵ دقیقه
P_2	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°C به مدت ۷ دقیقه
P_3	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°C به مدت۱۰ دقیقه
P_4	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰°C به مدت۵ دقیقه
P_5	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰°Cبه مدت ۷ دقیقه
P_6	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰°C به مدت ۱۰ دقیقه
P_7	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°C به مدت ۵ دقیقه
P_8	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°Cبه مدت ۷ دقیقه
P_9	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°C به مدت ۱۰ دقیقه
P_{10}	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰ °C به مدت ۵ دقیقه
P_{11}	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰ °C به مدت ۷ دقیقه
P_{12}	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰°C به مدت ۱۰ دقیقه

جدول ۲- مدل‌های ریاضی برای برآزش تغییرات محتوای رطوبتی قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق

شماره	مدل ریاضی
۱	$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left(\frac{-(2n+1)^2 m^2 D_{eff} t}{4L^2}\right.$
۲	$MR = \exp(-a.t)$
۳	$MR = a.b^x$
۴	$MR = \frac{1}{a.t+b}$
۵	$MR = a.t^2 + b.t + c$
۶	$MR = \frac{\exp(-a.t)}{1-b.t}$
۷	$MR = \frac{t+a}{b.t+a}$

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی مدل های به‌کاربرده شده در تحقیق

شماره	نام شاخص	معادله
۸	P- value	$P=\frac{100}{N}\sum\frac{\lvert M_t-M_{pre}\rvert}{M_t}$
۹	χ^2	$\chi^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp}-MR_{pre})^2}{N-n}$
۱۰	RMSE	$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pre}-MR_{exp})^2}{N}}$

اندازه‌گیری محتوای روغن: با به‌کارگیری روش سوکسله، محتوای روغن نمونه‌ها مطابق روش AOAC 1994 اندازه‌گیری شد (Anonymous, 1995).

مدل‌سازی جذب روغن قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق: برای مدل‌سازی جذب روغن قطعات سیب‌زمینی، طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، از ۶ مدل تجربی مطابق جدول ۴ استفاده شد (Moyano & Pedreschi, 2006).

که در آن‌ها: O: محتوای روغن در زمان t ام (گرم روغن/ گرم ماده‌ی خشک)، a: محتوای روغن تعادلی (یا حداکثر مقدار روغن) (گرم روغن / گرم ماده‌ی خشک) در $t=\infty$ ،b: سرعت ویژه جذب روغن برای مدل (s^{-1}) و c: ضریب مدل می‌باشند.

جدول ٤- مدل‌های ریاضی برای برآزش تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق

شماره	مدل ریاضی
۱۱	$O=a.t^2+b.t+c$
۱۲	$O=a.\exp(-b.t)+c$
۱۳	$O=\frac{1+t}{a.t+b}$
۱۴	$O=\frac{1-\exp(-a.t)}{(1-b.t)}$
۱۵	$O=\frac{a.b.t}{1+b.t}$
۱۶	$O=a.(1-\exp(-b.t))$

تعیین ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی: به‌منظور محاسبه مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت از قانون دوم فیک، طبق رابطه ۱۷ استفاده شد (Crank 1975).

$$MR=\frac{M_t-M_e}{M_0-M_e}=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left(\frac{-(2n+1)^2\pi^2D_{eff}t}{4L^2}\right) \quad (۱۷)$$

که در آن: MR: محتوای رطوبت بدون بعد، M_t: مقدار رطوبت در لحظه tام (گرم آب بر گرم ماده جامد بر پایه خشک، بدون روغن)، M_0: محتوای رطوبت اولیه (گرم آب بر گرم ماده جامد بر پایه خشک، بدون روغن)، M_e: محتوای رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده جامد بر پایه خشک، بدون روغن)، D_{eff} : ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s)، L: نصف ضخامت نمونه(m)، n: تعداد داده‌های آزمایشی، t: زمان سرخ‌کردن (s).

با فرض ناچیز بودن محتوای رطوبتی تعادلی (M_e=0)، رابطه ۱۷ به صورت رابطه۱۸ اصلاح گردید (Dehghan-Nasir *et al.*, 2011 ; Troncoso & Pdreschi, 2009).

$$MR=\frac{M_t}{M_0}=\frac{8}{\pi^2}\exp\left(\frac{\pi^2D_{eff}}{4L^2}\right) \quad (۱۸)$$

همچنین، برای محاسبه تاثیر دما بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت، از معادله آرنیوس، طبق رابطه ۱۹استفاده شد و انرژی فعال‌سازی نیز محاسبه شد (Saravacos & Maroulis, 2001).

$$D_{eff}=D_0exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۱۹)$$

D_{eff}: ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s)، D_o: فاکتور پیش‌نمایی (m^2/s)، E_a: انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)، R: ثابت جهانی گازها (K^{-1} .$kJ.kmol^{-1}$ ۸/۳۱۴۴۷۲)، T: دما (°K).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و در سه تکرار استفاده گردید و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۴ انجام شد.

نتایج و بحث

محتوای رطوبتی

جدول ۵ مقایسه میانگین تاثیر سه عامل زمان × فرکانس × دما را بر تغییرات نسبت محتوای رطوبتی نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵، با افزایش زمان سرخ‌کردن، نسبت محتوای رطوبتی در تمامی نمونه‌ها کاهش پیدا کرد. از سوی دیگر در زمان‌های سرخ کردن یکسان، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، در مقایسه با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز نسبت محتوایی رطوبتی بیشتری داشتند. همچنین نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و سرخ شده در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس در مدت زمان ۱۰ دقیقه، کمترین نسبت محتوای رطوبتی را دارا بودند.

کاهش نسبت محتوای رطوبتی نمونه‌های پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز نسبت به ۲۰ کیلوهرتز را می‌توان به ایجاد کانال‌های میکروسکوپی بیشتر در قطعات سیب‌زمینی نسبت داد. وجود هرچه بیشتر این کانال‌ها سبب می‌شود که هنگام سرخ-کردن نمونه‌ها در روغن، رطوبت با سرعت و سهولت بیشتری خارج شود (Fernandes *et al.*, 2009).

جدول ۵- مقایسه میانگین زمان × فرکانس × دما بر تغییرات نسبت محتوای رطوبتی (بدون بعد)

دما (°C)	زمان (min)	فرکانس (kHz) ۲۰	۴۰
۱۷۰	۵	۰/۶±۰/۱۲^{a}	۰/۵۲±۰/۰۸^{b}
۱۷۰	۷	۰/۵±۰/۱۱^{b}	۰/۴±۰/۰۵^{c}
۱۷۰	۱۰	۰/۲۶±۰/۱۳^{e}	۰/۲±۰/۰۸^{f}
۱۹۰	۵	۰/۴۶±۰/۰۱^{c}	۰/۳۴±۰/۰۹^{d}
۱۹۰	۷	۰/۲۸±۰/۰۱^{e}	۰/۲۳±۰/۰۸^{ef}
۱۹۰	۱۰	۰/۱۶±۰/۰۲^{g}	۰/۱۲±۰/۰۲^{g}

مدل‌سازی محتوای رطوبتی قطعات سیب‌زمینی

با تعیین مدل مناسب می‌توان مدت زمان لازم برای دستیابی به یک نمونه سرخ شده با میزان رطوبت معین را بدست آورد و نمونه غذایی را تنها تا زمان مورد نظر سرخ کرد. از طرف دیگر با بدست آوردن چنین مدل‌هایی لزوم انجام آزمایشات پرهزینه در شرایط مختلف ذکر شده در فرآیند سرخ کردن کاهش پیدا می‌کند و این مساله بیانگر اهمیت بالای چنین مدل‌هایی است. بر اساس نتایج که نمونه‌ای از آن در جدول ۶ ارایه شده‌است، در تمام دماها، سطوح مختلف فرکانس و زمان‌های مختلف سرخ‌کردن، مدل نمایی به‌علت داشتن بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 ، RMSE و P-value بهترین برازش را نشان داد.

بمنظور محاسبه ضریب مدل مذکور، تجزیه وتحلیل رگرسیونی چند متغیره مطابق جدول ۷ انجام شد. در تابع مذکور، نسبت محتوای رطوبتی به‌عنوان تابعی از زمان سرخ‌کردن در نظر گرفته شد و ضریب a تابعی از متغیرهای فرآیند بود.

کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقات خود، داده‌های آزمایشی محتوای رطوبتی قطعات سیب‌زمینی را با مدل‌های تجربی ارائه شده در جدول ۲ برازش نمودند. براساس نتایج، مدل نمایی، داده‌های آزمایش را به‌طور صحیحی برآزش نمود (Krokida *et al.*,2001a,b). Math و همکاران (۲۰۰۴)، داده‌های آزمایشی مربوط به محتوای رطوبتی سیب‌زمینی واریته کنبک را با مدل‌های ذکر شده در جدول ۲ برازش نمودند. بر اساس نتایج، مدل نمایی به‌همراه اصلاحاتی جزئی، داده‌ها را بخوبی برازش نمود. Ngadi و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه روی ناگت جوجه، داده‌های آزمایشی محتوای رطوبتی را با یک مدل سینتیکی برآزش نمودند.این مدل نیز فرم اصلاح شده‌ای از مدل کروکیدا و به شکل $MR = a\exp(-b.t)$ ، بود (Ngadi *et al.*, 2007).

جدول ٦- مقادیر ارزیابی مدل‌ها در دمای ۱۷۰°C ، فرکانس ۲۰kHz و زمان سرخ کردن ۵ دقیقه

مدل ریاضی	R^2	χ^2	RMSE	P-value(%)
$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left(\frac{-(2n+1)^2 m^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$	۰/۹۵	۰/۱۲	۰/۰۱۵	۷/۱۱
$MR = \exp(-a.t)$	۰/۹۹	۰/۱	۰/۰۰۱	۳/۱۲
$MR = a.b^x$	۰/۹۸	۰/۲۴	۰/۰۱۸	۴/۵
$MR = \frac{1}{a.t+b}$	۰/۹۸	۰/۲۵	۰/۰۱۴	۱۲/۲۱
$MR = a.t^2 + b.t + c$	۰/۹۵	۰/۱۴	۰/۰۱۸	۱۲/۵
$MR = \frac{\exp(-a.t)}{1-b.t}$	۰/۸۵	۰/۲۵	۰/۰۲۴	۱۰/۱۱
$MR = \frac{\frac{t}{t+a}}{b.t+a}$	۰/۹۳	۰/۲۴	۰/۰۱۹	۱۵/۱۳

جدول ۷- برازش داده های حاصل از تیمارهای آزمایش با مدل نمایی

دما(°C)	زمان(min)	فرکانس ۲۰ a	R^2	χ^2	RMSE	P-value (%)	۴۰ a	R^2	χ^2	RMSE	P-value (%)
۱۷۰	۵	۱/۱۸	۰/۹۹	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۴/۲۱	۱/۲	۰/۹۹	۰/۲۱	۰/۰۰۲	۴/۲۱
۱۷۰	۷	۲/۲۱	۰/۹۹	۰/۲۲	۰/۰۰۲	۴/۲۱	۲/۱۲	۰/۹۹	۰/۱۳	۰/۰۰۱	۳/۱۵
۱۷۰	۱۰	۱/۱۵	۰/۹۸	۰/۴۱	۰/۰۰۲	۳/۱۵	۱/۱۴	۰/۹۸	۰/۴۵	۰/۰۰۲	۴/۲۱
۱۹۰	۵	۲/۱۴	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۰۰۳	۴/۲۵	۱/۰۱	۰/۹۹	۰/۱۴	۰/۰۰۲	۳/۵۴
۱۹۰	۷	۱/۱۶	۰/۹۹	۰/۱۳	۰/۰۰۲	۳/۶۵	۲/۱۳	۰/۹۹	۰/۲۶	۰/۰۰۱	۵/۵۸
۱۹۰	۱۰	۱/۱۲	۰/۹۹	۰/۲۴	۰/۰۰۳	۵/۴۲	۱/۱	۰/۹۹	۰/۵۸	۰/۰۰۱	۵/۱۴

محتوای روغن

جدول ۸ مقایسه میانگین تاثیر سه عامل زمان × فرکانس × دما را بر تغییرات محتوای روغن نشان می‌دهد.

جدول ۸ مقایسه میانگین زمان × فرکانس × دما بر تغییرات محتوای روغن (بدون بعد)

فرکانس(kHz)		زمان (min)	دما (°C)
۴۰	۲۰		
۰/۰۹±۰/۰۱^{h}	۰/۱۶±۰/۰۳^{f}	۵	۱۷۰
۰/۱۸±۰/۰۳^{e}	۰/۲۴±۰/۰۱^{c}	۷	۱۷۰
۰/۲۴±۰/۰۲۱^{c}	۰/۲۹±۰/۰۳^{a}	۱۰	۱۷۰
۰/۰۷±۰/۰۱۴^{j}	۰/۱۳±۰/۰۱^{g}	۵	۱۹۰
۰/۱۴±۰/۰۱۲^{g}	۰/۲۲±۰/۰۳^{d}	۷	۱۹۰
۰/۱۷±۰/۰۱۳^{ef}	۰/۲۶±۰/۰۲^{b}	۱۰	۱۹۰

با توجه به جدول ۸ در زمان‌های سرخ‌کردن یکسان، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، در مقایسه با نمونه‌های پیش تیمار شده در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، کمترین میزان جذب روغن را از خود نشان دادند. در بیان علت این فرآیند باید گفت، طی انجام پیش‌تیمار اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، کانال‌های میکروسکوپی بیشتری تولید می‌گردد. لذا خروج رطوبت افزایش می‌یابد که طی آن فشار بخار بیشتری در اطراف ماده غذایی حین فرایند سرخ‌کردن تولید می‌شود که از نفوذ روغن در ماده غذایی جلوگیری می‌نماید و یا حداقل سبب کاهش میزان جذب روغن می‌شود. در بررسی تاثیر دما بر جذب روغن، هنگامی که محتوای روغن به صورت تابعی از زمان سرخ‌کردن در نظر گرفته شد، مشخص گردید که دماهای بالای سرخ‌کردن باعث کاهش جذب روغن می‌شود. بسیاری از محققین نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابهی دست یافتند (Moyano and Pedreschi, 2006; Ziaiifar *et al.*, 2010). در واقع در دماهای بالاتر، روغن طی فرآیند سرخ کردن باعث ایجاد یک پوسته سخت و محکم تر بر سطح خارجی ماده غذایی می شود و این پوسته به عنوان یک مانع فیزیکی در برابر ورود روغن به بخش درونی محصول عمل می‌کند که این مسئله به نوبه خود منجر به کاهش جذب روغن می‌شود. از سوی دیگر می‌توان بیان نمود که در دماهای پایین سرخ کردن نسبت به دماهای بالاتر، برای رسیدن به یک محتوای رطوبتی تقریبا یکسان، زمان بیشتری نیاز می‌باشد. بنابراین، با افزایش زمان سرخ‌کردن، جذب روغن می‌تواند افزایش یابد (Moyano and Berna, 2002). نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان ۵ دقیقه، دارای کمترین میزان جذب روغن بودند.

مدل‌سازی جذب روغن در قطعات سیب‌زمینی

با توجه به نتایج که نمونه‌ای از آن در جدول ۹ بیان شده‌است، در تمام دماها، سطوح مختلف فرکانس و زمان‌های مختلف سرخ‌کردن، مدل $O=\frac{a.b.t}{1+b.t}$ به‌علت داشتن بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 ، RMSE و P-value بهترین برآزش را نشان داد.

بمنظور محاسبه ضرایب مدل مذکور، تجزیه وتحلیل رگرسیونی چند متغیره مطابق جدول۱۰ انجام شد. در تابع مذکور میزان جذب روغن به‌عنوان تابعی از زمان سرخ‌کردن بوده و ضرایب a و b نیز تابعی از متغیرهای فرآیند می‌باشند.

مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶) نیز در تحقیقات خود روی ناگت مرغ به نتایج مشابهی دست یافتند (Moyano and Pedreschi, 2006).

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

جدول۱۱، مقایسه‌ی میانگین تاثیر متقابل سه عامل زمان× فرکانس× دما را بر متوسط ضریب انتشار موثر رطوبت نمونه ها نشان می‌دهد.

جدول ۹- مقادیر ارزیابی مدل‌ها در دمای ۱۹۰°C ، فرکانس ۴۰kHz و زمان سرخ کردن ۵ دقیقه

مدل ریاضی	R^2	χ^2	RMSE	P- value(%)
$O=a.t^2+b.t+c$	۰/۹۷	۰/۳۱	۰/۰۶۲	۱۵/۳۶
$O=a.\exp(-b.t)+c$	۰/۹۹	۰/۶۳	۰/۰۴۱	۱۴/۲۵
$O=\frac{1+t}{a.t+b}$	۰/۹۸	۰/۲۴	۰/۰۵۱	۱۳/۲۴
$O=\frac{1-\exp(-a.t)}{(1-b.t)}$	۰/۹۵	۰/۱۲	۰/۰۲۴	۲۰/۲۵
$O=\frac{a.b.t}{1+b.t}$	۰/۹۹	۰/۱۰	۰/۰۰۹	۵/۱۴
$O=a.(1-\exp(-b.t))$	۰/۹۸	۰/۱۵	۰/۰۲۵	۱۶/۱۴

جدول ۱۰- برازش داده های حاصل از تیمارهای آزمایش با مدل نمایی

فرکانس(kHz)											
۲۰						٤٠					
دما($^{\circ}C$)	زمان(min)	a	b	R^2	χ^2	RMSE	a	b	R^2	χ^2	RMSE
۱۷۰	۵	۱/۵	۰/۴۵	۰/۹۸	۰/۱۴	۰/۰۱۴	۱/۱۴	۰/۵۱	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲
۱۷۰	۷	۱/۲	۰/۱۵	۰/۹۹	۰/۱۵	۰/۰۴۱	۲/۲۴	۰/۱۲	۰/۹۹	۰/۱۴	۰/۰۱۴
۱۷۰	۱۰	۲/۱	۰/۴۱	۰/۹۹	۰/۱۴	۰/۰۲۱	۱/۱۵	۰/۴۱	۰/۹۸	۰/۲۱	۰/۰۲۱
۱۹۰	۵	۲/۲	۰/۲۳	۰/۹۸	۰/۱۶	۰/۰۱۵	۱/۱۴	۰/۲۱	۰/۹۹	۰/۱۸	۰/۰۱۴
۱۹۰	۷	۲/۱	۰/۲۸	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۰۲۱	۲/۲۱	۰/۱۲	۰/۹۹	۰/۱۷	۰/۰۱۱
۱۹۰	۱۰	۳/۲	۰/۲۵	۰/۹۹	۰/۱۱	۰/۰۱۴	۱/۱۱	۱/۲۱	۰/۹۸	۰/۱۸	۰/۰۱۴

جدول ۱۱- مقایسه میانگین زمان× فرکانس× دما بر متوسط ضریب انتشار موثر رطوبت (m^2/s)

ضریب انتشار موثر رطوبت (m^2/s)	زمان (min)	دما (°C)	فرکانس(kHz)
$۸/۸۰\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۹a}$	۵	۱۹۰	۴۰
$۸/۶۳\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۹a}$	۷	۱۹۰	۴۰
$۸/۲۵\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۹b}$	۱۰	۱۹۰	۴۰
$۸/۳۲\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۹b}$	۵	۱۷۰	۴۰
$۸/۰۳\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۹c}$	۷	۱۷۰	۴۰
$۷/۸۷\times۱۰^{-۸} \pm ۱/۱\times۱۰^{-۱۰c}$	۱۰	۱۷۰	۴۰
$۷/۷۲\times۱۰^{-۸} \pm ۱/۱\times۱۰^{-۱۰cd}$	۵	۱۹۰	۲۰
$۷/۵۰\times۱۰^{-۸} \pm ۱/۱\times۱۰^{-۱۰d}$	۷	۱۹۰	۲۰
$۷/۳۸\times۱۰^{-۸} \pm ۱/۱\times۱۰^{-۱۰d}$	۱۰	۱۹۰	۲۰
$۷/۴۱\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۹d}$	۵	۱۷۰	۲۰
$۷/۲۸\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۹e}$	۷	۱۷۰	۲۰
$۶/۹۵\times۱۰^{-۸} \pm ۱\times۱۰^{-۱۰f}$	۱۰	۱۷۰	۲۰

با توجه به جدول ۱۱، در زمان‌های ابتدایی فرآیند سرخ‌کردن، به دلیل وجود رطوبت کافی در بخش مرکزی نمونه‌ها، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت بالا بود اما با گذشت زمان سرخ‌کردن و کاهش آهنگ خروج رطوبت از نمونه‌ها، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت کاهش یافت. با توجه به نتایج، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و در مدت زمان ۵ دقیقه سرخ کردن، بالاترین ضریب انتشار موثر رطوبت ($۸/۸۰\times۱۰^{-۸}$ m^2/s) را داشتند. علت را می‌توان ایجاد کانال‌های میکروسکوپی بیشتر در قطعات سیب زمینی طی انجام پیش تیمار اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز نسبت داد. این فرآیند سبب می‌شود طی سرخ‌کردن، رطوبت با سهولت و سرعت بیشتری از نمونه‌ها خارج شده و در نتیجه میزان ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش یابد.

Troncosoو Pedreschi (۲۰۰۹) در تحقیقات خود فرآیند ازدست دادن آب و جذب روغن را حین سرخ کردن عمیق ورقه‌های سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده (نمونه‌های آنزیم‌بری شده در آب داغ در دمای $۸۵^{\circ}C$ به مدت ۳ دقیقه و نمونه‌های آنزیم بری شده و خشک شده با هوای داغ در دمای $۶۰^{\circ}C$ با سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه) بررسی نمودند و به نتایج مشابهی دست یافتند. بطور کلی مقایسه مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت در تحقیقات مختلف به‌آسانی امکان‌پذیر نیست زیرا مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت نمونه‌های سرخ‌شده، تحت تاثیر عواملی مانند نوع فرآیند سرخ‌کردن (تحت فشار اتمسفری یا خلاء)، نوع ماده غذایی، واریته سیب‌زمینی مورد آزمایش، دما، زمان سرخ کردن، شکل، ضخامت نمونه‌ها و پیش‌تیمارهای انجام شده تغییر می‌کند (Dehghan- Troncoso & Pedreschi, 2009 ; Nasir *et al.*, 2011).

انرژی فعال‌سازی

جدول ۱۲، مقایسه‌ی میانگین تاثیر متقابل سه عامل زمان× فرکانس× دما را بر متوسط انرژی فعال سازی نمونه ها نشان می‌دهد.

جدول ۱۲- مقایسه میانگین زمان × فرکانس × دما بر متوسط انرژی فعال سازی (kJ/mol)

انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)	زمان (min)	دما (°C)	فرکانس(kHz)
۱۶/۳۰۷±۲/۱۱[a]	۱۰	۱۷۰	۴۰
۱۶/۲۱۶±۲/۲۱[a]	۷	۱۷۰	۴۰
۱۶/۱۰۸±۲/۰۷[a]	۵	۱۷۰	۴۰
۱۵/۹۸۳±۲/۷۱[b]	۱۰	۱۹۰	۴۰
۱۵/۴۰۵±۲/۴۱[b]	۷	۱۹۰	۴۰
۱۵/۰۲۱±۲/۲[b]	۵	۱۹۰	۴۰
۱۴/۷۶۱±۲/۵[c]	۱۰	۱۷۰	۲۰
۱۴/۱۱۷±۲/۴[d]	۷	۱۷۰	۲۰
۱۳/۷۴۳±۱/۷۱[ef]	۵	۱۷۰	۲۰
۱۳/۵۶۸±۲/۰۵[fg]	۱۰	۱۹۰	۲۰
۱۳/۳۸۷±۱/۱۸[g]	۷	۱۹۰	۲۰
۱۳/۱۶۱±۲/۱[h]	۵	۱۹۰	۲۰

با توجه به رابطه معکوس بین محتوای رطوبتی و انرژی فعال‌سازی می‌توان بیان کرد که مقادیر انرژی فعال سازی بالا، معمولا در مواد با محتوای رطوبت پایین‌تر بدست می آید (Saravacos & Maroulis, 2001). بیشترین مقدار انرژی فعال-سازی (۱۶/۳۰۷ kJ/mol) در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و زمان ۱۰ دقیقه و کمترین مقدار انرژی فعال‌سازی (۱۳/۱۶۱ kJ/mol) در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان ۵ دقیقه بدست آمد. در محتوای رطوبتی پایین‌تر میزان انرژی فعال‌سازی مورد نیاز جهت خروج رطوبت از ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن افزایش پیدا می‌کند. مطابق رابطه آرنیوس دمای فرآیند سرخ‌کردن از عوامل اصلی تاثیرگذاری بر روی ضریب انتشار موثر رطوبت و در نتیجه روی مقدار انرژی فعال‌سازی می‌باشد. زیرا میزان انرژی فعال سازی از طریق رسم نمودار لگاریتم طبیعی ضریب انتشار موثر رطوبت در مقابل عکس دمای سرخ‌کردن بدست می‌آید. در واقع با افزایش دمای سرخ‌کردن به ویژه در دماهای بالا، به دلیل افزایش آهنگ خروج رطوبت از ماده غذایی و در نتیجه افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت، مقدار انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای خارج شدن آب از قطعات سیب زمینی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می کند (Ngadi *et al.*, 2007). از طرفی زمان فرآیند سرخ‌کردن نیز می‌تواند از عوامل تاثیرگذار بر روی میزان انرژی فعال‌سازی باشد. به طوری که در زمان های ابتدایی فرآیند سرخ-کردن، به دلیل وجود رطوبت کافی در بخش مرکزی نمونه‌ها، مقدار انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای خارج شدن آب پایین می‌باشد (مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت بالا) ولی با گذشت زمان سرخ‌کردن و کاهش آهنگ خروج رطوبت از نمونه‌ها، مقدار انرژی فعال‌سازی لازم نیز افزایش می‌یابد (Dehghan-Nasir *et al.*, 2011 ; Troncoso & Pedreschi, 2009).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، در شرایط دما و زمان یکسان، در مقایسه با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز نسبت محتوای رطوبتی بیشتری داشتند. بیشترین محتوای رطوبتی در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و زمان ۵ دقیقه بدست آمد. از سوی دیگر نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، در مقایسه با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی بیشتری داشتند. بیشترین ضریب انتشار موثر رطوبت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان ۵ دقیقه و بیشترین و انرژی فعال‌سازی در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و زمان ۱۰ دقیقه و بدست آمد. لازم به ذکر است که محدوده بدست آمده برای ضریب انتشار مؤثر رطوبت m^2/s $^{-8}$ ۱۰×۸/۸۰ – ۱۰×۶/۹۵ $^{-8}$ و برای انرژی فعال‌سازی kJ/mol ۱۶/۳۰۷– ۱۳/۱۶۱ بود. همچنین نمونه‌های پیش تیمار شده در فرکانس ۴۰kHz، از کمترین میزان جذب روغن نسبت به نمونه‌های پیش تیمار شده در فرکانس ۲۰kHz برخوردار بودند. بیشترین میزان جذب روغن در فرکانس ۲۰kHz، دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و طی سرخ کردن به مدت ۱۰ دقیقه به‌دست آمد. بر اساس نتایج، این‌که مدل نمایی بهترین برآزش را به‌منظور بررسی تغییرات محتوای رطوبت و جذب روغن قطعات سیب‌زمینی نشان داد.

منابع

Anonymous, 1995, AOAC Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis, Arlington.

Anonymous, 2011, *Food Agriculture Organization of the United Nations*. Official Methods.

Bravo, J., Sanjuan, N., Ruales, J. and Mulet, A., 2009, Modeling the Dehydration of Apple Slices by Deep Fat Frying. Drying Technology, 27(6), 782-786.

Crank, J., 1975, The mathematics of diffusion, 2nd Edition. Oxford, Clarendon press.

Dana, D. and Saguy, I. S., 2006, Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. *Advances in Colloid and Interface Science*, 128, 267-272.

Dehghan Nasiri, F., Mohebbi, M., Tabatabaee Yazdi, F. & Haddad Khodaparast, M. H., 2011, Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Byproducts Processing*, 89 (3), 241–247.

Duran, M., Pedreschi, F., Moyano, P. & Troncoso, E., 2007, Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 257-265.

Fernandes, F., Gallao, M.I. and Rodrigues, S., 2009, Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 186-190.

Gazmuri, A. M. and Bouchon, P., 2009, Analysis of wheat gluten and starch matrices during deep-fat frying. *Food Chemistry*, 115(3), 999-1005.

Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. and Marinos-Kouris, D., 2001b, Effect of pre-drying on quality of french fries. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 347-354.

Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B and Marinos-Kouris, D., 2001a, Effect of osmotic dedydration pretreatment on quality of french fries. *Journal of Food Engineering*, 49 (4), 339–345.

Lisinska, G. and Leszczyneski, W.,1989, Potato Science and Technology. Elsevier science publisher, pp, 166-227.

Math, R., Velu, V., Nagender, A. and Rao, D. G., 2004, Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papa. *Journal of Food Engineering*, 64 (4), 429–434.

Moyano, P. and Berna, A. Z., 2002, Modeling Water Loss During Frying of Potato Strips: Effect of Solute Impregnation Drying Technology. *An International Journal*, 20 (7), 1303-1318.

Moyano, P. C. and Pedreschi, F., 2006, Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: effect of pretreatments. *Lwt-Food Science and Technology*, 39(3), 285-291.

Ngadi, M., Li, Y. and Oluka, S., 2007, Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different degrees of hydrogenatation. *LWT*, 40(10), 1784-1791.

Pedreschi, F., Hernandez, P., Figueroa, C. and Moyano, P., 2005, Modeling Water Loss During Frying of Potato Slices. *International Journal of Food Properties*, 8(2), 289-299.

Saravacos, G. D. and Maroulis, Z. A., 2001, Transport Properties of Foods. Marcel Dekker: New York, Marcel Dekker, Inc.

Troncoso, E. and Pedreschi, F., 2009, Modeling water loose and oil uptake during vacuumed frying of pre-treatment potato slices. *Lwt-Food Science and Technology*, 42(6), 1164-1173.

Ziaiifar, 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.

Ziaiifar, A. M., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I. and Trystram, G., 2008, Review of mechanisms, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science and Technology*, 43(8), 1410-1423.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 11, No. 5, Dec - Jan 2015, p. 597-607

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۱، شماره ۵، آذر- دی ۱۳۹۴، ص. ۶۰۷-۵۹۸

Modelling Moisture Content Variations and Oil Absorption of Deep-Fried Potato Slices (Satina)

F. Roushani[1], S. Movahed[2*], H. Ahmadi Chenarbon[3]

Received: 2014.01.14
Accepted: 2015.01.04

Introduction: Potato is raw food stuff with high popularity worldwide when deep fried. Deep frying is a fast budget process used for preparing savory food. In this process, oil is used both as a heating intermediate and as an ingredient producing calorific products. Nutrition has become a major health concern, particularly in developmental countries where obesity has turned into an ever-increasing problem, mostly among children. Deep frying is a widely-practiced method for cooking fast foods with desirable sensory properties. Frying is a process of simultaneous heat and mass transfer where heat is transferred by a combination of convection and conduction. At high temperatures, a great amount of moisture content is also lost as vapor, compensated by oil uptake in foods. Oil uptake of foods is an important concern associated with their moisture loss. Thus, it is important to examine moisture loss during frying. Today, the interest in production and consumption of low-fat French fries is on the rise. At the same time, the frying method has a great effect on quantitative and qualitative characteristics of foods. The final moisture content in French fries is about 38% of the product's final weight. sufficient moisture content is therefore required in French fries to achieve both a soft moist core and a crunchy tasty crust. Numerous methods or pretreatments such as ultrasound and drying may improve these properties. Moreover, finding relationships between different variables during deep frying by modelling may provide an optimal control over process conditions thereby improving the quality of the final fried product. In the present study, effects of ultrasound and drying pretreatments on moisture content, oil uptake, activation energy and effective moisture diffusion coefficient in Satina potato slices during deep frying were investigated.

Material and methods: 10kg of Satina potatoes were provided and stored at room temperature. Bahar vegetable frying oil containing cotton seed, sunflower and soybean oils was used for frying. For each experiment, potatoes were washed, peeled and sliced by a household French fry cutter with 1.2×1.2×4 cm dimensions. The cut samples were placed in a plate to avoid moisture loss and were washed with distilled water to remove surface starch before frying. The excess surface water was also removed by a hygroscopic paper. Then ultrasonic pretreatments at two frequencies of 20 and 40 kHz were applied for 15min, and the drying pretreatment was also conducted at 60°C for 15min. To fry the samples the fryer was filled with 1.5 lit of oil. The deep fryer was set to adjust temperature and frying time automatically. When the temperature reached the set value, 100-120g potato samples were placed in the frying basket, which was then submerged in oil automatically. The pretreated samples were fried at 170°C and 190°C for 5, 7 and 10 min. Oil uptake and moisture loss during frying were recorded at certain time intervals. Next, the fried samples were removed from the deep fryer and were placed on a mesh tray to remove the excess oil. The oil uptake and moisture content were analyzed. Oil content was measured by the Soxhlet method. It is based on extracting fat from foods using proper solvents. Moisture content was measured by drying in a convection oven at 105°C until reaching a constant weight. Moisture content and oil uptake of potatoes slices during deep frying were also modeled versus time. The factorial experiment was laid out in a completely randomized design with three replications, and means were compared using Duncan's multiple-range test. SPSS 14 was used for statistical analyses.

Results & Discussion: According to the results, samples pretreated with 20 kHz ultrasound at the same temperature and time conditions had higher moisture content than those treated with the 40 kHz frequency. The highest moisture content was found in samples pretreated with 20 kHz at 170°C for 5min. On the other hand, samples receiving 40 kHz ultrasound pretreatment showed higher effective moisture diffusion coefficient and activation energy than those receiving the 20 kHz pretreatment. The highest diffusion coefficient was achieved using 40 kHz at 190°C for 5min, whereas the highest activation energy was observed with 40 kHz at 170°C for 10 min. It should be mentioned that the effective diffusion coefficient was within the $6.95 \times 10^{-8} - 8.80 \times 10^{-8}$

1 and 2- Graduate Student and Associated Professor, Department of Food Science, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran. respectively
3- Assisstant Professor, Department of Agronomy, Varamin - Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran.
(*Corresponding Author E-mail: movahhed@iauvaramin.ac.ir)

m^2/s (R^2=0.99) range. Activation energy was also in the range of 13.161 – 16.307 kJ/mol (R^2=0.99).

Conclution: Samples pretreated with 40 kHz ultrasound showed the lowest oil uptake as compared with those pretreated with 20 kHz frequency. The highest oil uptake was observed for samples pretreated with 20 kHz at 170°C for 10 min. Through the multivariable regression analysis, it was found that the exponential model had the best fitting in predicting changes in moisture content and oil absorption.

Keywords: Ultrasound, Deep Frying, Potato, Moisture Content, Oil Uptake, Modelling.