

## بررسی تغییرات محتوای رطوبت و جذب روغن به همراه مدل‌سازی آن‌ها در قطعات سیب‌زمینی رقم ساتینا طی فرآیند سرخ کردن عمیق

فاطمه روشنی<sup>۱</sup>، سارا موحد<sup>۲\*</sup>، حسین احمدی چناربن<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت ۱۳۹۲/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۱۴

### چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر پیش‌تیمارهای اولتراسوند و خشک کردن، بر محتوای رطوبت و میزان جذب روغن قطعات سیب‌زمینی رقم ساتینا، طی فرآیند سرخ کردن عمیق مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌تیمار اولتراسوند در دو فرکانس ۲۰ و ۴۰ کیلوهرتز، به مدت ۱۵ دقیقه و پیش‌تیمار خشک کردن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. پس از آن قطعات سیب‌زمینی در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و به مدت ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه سرخ شدند. با توجه به نتایج، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند، در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، در دما و زمان یکسان، از محتوای رطوبتی کمتری برخوردار بودند. قابل توجه این که با افزایش دمای سرخ کردن و فرکانس، ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش و محدوده‌ی آن  $8/8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $6/95 \times 10^{-8}$  محاسبه شد ( $R^2=0/99$ ). از سوی دیگر با افزایش فرکانس، انرژی فعال‌سازی افزایش و محدوده‌ی آن  $13/161-16/307 \text{ kJ/mol}$  تعیین گردید ( $R^2=0/99$ ). 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، مدل‌نمایی بهترین برازش را به‌منظور بررسی تغییرات محتوای رطوبت و روغن نمونه‌ها نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** اولتراسوند، سرخ کردن عمیق، سیب‌زمینی، محتوای رطوبت، جذب روغن، مدل‌سازی.

### مقدمه

سرخ شده آن شامل چیپس و خلال سرخ شده می‌باشد (Lisinska & Leszczynski, 1998). سرخ کردن 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، پیش‌تیمارها و ترکیب ماده غذایی (میزان رطوبت و مواد جامد اولیه) قرار می‌گیرد (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 پیش‌تیمارهایی که محتوای آب اولیه محصول را کاهش دهد سبب بهبود خصوصیات کیفی محصول سرخ شده خواهند شد. پیش‌تیمار خشک کردن قبل از سرخ کردن، از طریق

سیب‌زمینی با نام علمی سولانوم توبروزوم (*Solanum tuberosum*)، گیاهی است از خانواده سیب‌زمینیان (*Solanaceae*) 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

۱ و 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)

۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰°C تا رسیدن به محتوای رطوبت ۱/۸٪ (بر اساس وزن مرطوب) سرخ شدند. نتایج نشان داد که پیش تیمار 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 خشک کردن بر محتوای رطوبت، جذب روغن، انرژی فعال‌سازی و ضریب انتشار موثر رطوبت در قطعات سیب‌زمینی، حین فرآیند سرخ کردن عمیق بود.

## مواد و روش‌ها

### مواد

سیب‌زمینی واریته ساتینا، از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهیه و در دمای محیط نگهداری شد. به منظور سرخ کردن، از روغن گیاهی مخصوص سرخ کردنی بهار که مخلوطی از روغن پنبه‌دانه، آفتابگردان و سویا بود، استفاده گردید. در این تحقیق جهت خال کردن نمونه‌های سیب‌زمینی، از خلال کن خانگی Genius ساخت آلمان، به منظور انجام پیش تیمارهای خشک کردن و اولتراسوند به ترتیب از خشک کن سینی دار 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، به منظور سرخ کردن، از سرخ کن مجهز به سیستم تنظیم دما و زمان، مدل Moulinex، ساخت فرانسه و به منظور اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها از آون Shimaz/TPS6777، ساخت ایران استفاده شد.

### روش‌ها

**آماده‌سازی نمونه‌ها:** برای انجام آزمایش، سیب‌زمینی‌ها پس از شستشو و پوست‌گیری، توسط خلال کن خانگی به ابعاد ۱/۲×۱/۲×۴ سانتی‌متر برش داده شدند. 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 رطوبت گیر گرفته شد. نمونه‌ها جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در دستگاه حمام فراصوت، تحت فرکانس‌های ۲۰ و ۴۰ کیلوهرتز در مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و سپس جهت انجام پیش تیمار خشک کردن، در دستگاه خشک کن سینی دار، در دمای ۶۰°C و به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شدند.

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 خشک کردن، استفاده از اولتراسوند نیز قبل از سرخ کردن عمیق می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. طی عمل سونیکاسیون، امواج صوتی طولی به محیط مایع برخورد کرده و سبب ایجاد کاویتاسیون می‌گردد. کاویتاسیون باعث ایجاد انقباض و انبساط‌های 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 (Ziaifar et al., 2008). بر اساس نتایج تحقیقات، استفاده از پیش تیمار 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 می‌گردد (Fernandes et al., 2009). Bravo و همکاران (۲۰۰۹) مدل سازی از دست دادن آب برای ورقه‌های سیب‌زمینی را حین سرخ کردن عمیق مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج، با افزایش دما، ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش یافت و محدوده‌ی آن  $9 \text{ m}^2/\text{s}$  -  $10 \times 10^{-9}$  تا  $17 \times 10^{-9}$  محاسبه شد. Krokida و همکاران (۲۰۰۰) تاثیر شرایط سرخ کردن (دمای روغن و ضخامت نمونه) را بر خصوصیات ساختاری (دانسیته ظاهری و دانسیته واقعی) قطعات سیب زمینی بررسی نمودند. ابتدا قطعات سیب‌زمینی با ابعاد  $1 \times 1 \times 4 \text{ cm}$ ،  $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ cm}$  و  $1.5 \times 1.5 \times 4 \text{ cm}$  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. Moyano و Pedreschi (۲۰۰۵) اثر پیش تیمار 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 آن با جریان هوای کنوکسیون 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

استفاده شد که در آن ها  $b, t, x, L, c, a, n, m$  ضرایب مدل ها می باشند.

در فرآیند مدل سازی، برای برازش داده ها از روش رگرسیون غیرخطی استفاده گردید و مدل های مذکور با داده ها برازش شدند. برای تعیین مناسب بودن برازش، علاوه بر ضریب تعیین  $R^2$ ، از سه شاخص دیگر به شرح جدول ۳ استفاده شد. که در آن ها:  $M_i$ : مقدار رطوبت محصول،  $M_{pre}$ : مقدار رطوبت پیش بینی شده توسط مدل،  $N$ : تعداد مشاهدات،  $n$ : تعداد ثابت های مدل،  $MR_{exp}$ : نسبت رطوبت داده های آزمایشی و  $MR_{pre}$ : نسبت رطوبت پیش بینی شده می باشند. حال هر چه مقدار  $R^2$  بیشتر و مقادیر شاخص های دیگر کمتر باشد، نشان دهنده ی برازش بهتر آن مدل می باشد.

**فرآیند سرخ کردن:** بمنظور سرخ کردن نمونه ها، ابتدا سرخ کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ کردن مورد نظر، روی حالت اتوماتیک قرار داده شد. پس از رسیدن دمای سرخ کن به دمای مورد نظر، سبد حاوی نمونه ها در روغن غوطه ور گردید. نمونه های پیش تیمار شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰°C و به مدت ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه سرخ شدند. پس از سرخ شدن نمونه ها در مدت زمان مورد نظر، از سرخ کن خارج و بر روی سینی مشبک قرار گرفتند تا روغن اضافی خلال ها گرفته شد. آن گاه محتوای روغن و رطوبت نمونه ها اندازه گیری شد. تیمارهای مورد استفاده در تحقیق در جدول ۱ ارایه شده است.

**اندازه گیری محتوای رطوبت:** محتوای رطوبت نمونه ها با خشک کردن آن ها در یک اون کلوکسیونی تا رسیدن به وزن ثابت، در دمای ۱۰۵°C تعیین شد (Anonymous, 1995).

**مدل سازی محتوای رطوبت قطعات سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق:** برای مدل سازی محتوای رطوبت قطعات سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق، از ۷ مدل تجربی مطابق جدول ۲

جدول ۱- تیمارهای به کار رفته در تحقیق

کد تیمار	تیمارهای تحقیق
P <sub>1</sub>	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 <sub>2</sub>	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 <sub>3</sub>	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°C به مدت ۱۰ دقیقه
P <sub>4</sub>	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰°C به مدت ۵ دقیقه
P <sub>5</sub>	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۲۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۹۰°C به مدت ۷ دقیقه
P <sub>6</sub>	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 <sub>7</sub>	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 <sub>8</sub>	سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz، خشک شده در ۶۰°C و سرخ شده در ۱۷۰°C به مدت ۷ دقیقه
P <sub>9</sub>	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 <sub>10</sub>	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 <sub>11</sub>	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 <sub>12</sub>	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- مدل های ریاضی برای برازش تغییرات محتوای رطوبتی قطعات سیب زمینی با گذشت زمان، طی فرآیند سرخ کردن 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	$MR = \exp(-a \cdot t)$
۳	$MR = a \cdot b^x$
۴	$MR = \frac{1}{a \cdot t + b}$
۵	$MR = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$
۶	$MR = \frac{\exp(-a \cdot t)}{1 - \frac{b \cdot t}{t + a}}$
۷	$MR = \frac{b \cdot t + a}{b \cdot t + a}$

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 سرخ کردن ( $s$ ).  
با فرض ناچیز بودن محتوای رطوبتی تعادلی ( $M_e=0$ )، رابطه ۱۷ به صورت رابطه ۱۸ اصلاح گردید (Dehghan-Nasir et al., 2011; Troncoso & Pdreschi, 2009):

$$MR = \frac{M_t}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (18)$$

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

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (19)$$

$D_0$ : ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $m^2/s$ )،  $D_0$ : فاکتور پیش‌نمایی ( $m^2/s$ )،  $E_a$ : انرژی فعال‌سازی ( $kJ/mol$ )،  $R$ : ثابت جهانی گازها ( $K^{-1}$ )،  $T$ : دما ( $^{\circ}K$ )،  $8.314472 kJ \cdot kmol^{-1}$ .

### 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  $\times$  فرکانس  $\times$  دما را بر تغییرات نسبت محتوای رطوبتی نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵، با افزایش زمان سرخ کردن، 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 محتوای 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 پیش‌تیمار 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 ۳- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های به‌کاربرده شده در تحقیق

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

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

سرخ کردن عمیق: برای مدل‌سازی جذب روغن قطعات سیب‌زمینی، طی فرآیند سرخ کردن 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 ۴- مدل‌های ریاضی برای برآزش تغییرات محتوای روغن

قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، طی فرآیند سرخ کردن عمیق

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

### تعیین ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی:

به‌منظور محاسبه مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت از قانون دوم فیک، طبق رابطه ۱۷ استفاده شد (Crank 1975):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (17)$$

که در آن:  $MR$ : محتوای رطوبت بدون بعد،  $M_t$ : مقدار رطوبت در لحظه  $t$  ام (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

مختلف فرکانس و زمان های مختلف سرخ کردن، مدل نمایی به علت داشتن بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$ ، RMSE و P-value بهترین برازش را نشان داد.

بمنظور محاسبه ضریب مدل مذکور، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره مطابق جدول ۷ انجام شد. در تابع مذکور، نسبت محتوای رطوبتی به عنوان تابعی از زمان سرخ کردن در نظر گرفته شد و ضریب a تابعی از متغیرهای فرآیند بود.

کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقات خود، داده های آزمایشی محتوای رطوبتی قطعات سیب زمینی را با مدل های تجربی ارائه شده در جدول ۲ برازش نمودند. براساس نتایج، مدل نمایی، داده های آزمایش را به طور صحیحی برآزش نمود (Krokida et al., 2001a,b). Math و همکاران (۲۰۰۴)، داده های آزمایشی مربوط به محتوای رطوبتی سیب زمینی وارسته کنیک را با مدل های ذکر شده در جدول ۲ برازش نمودند. بر اساس نتایج، مدل نمایی به همراه اصلاحاتی جزئی، داده ها را بخوبی برازش نمود. Ngadi و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه روی ناگت جوجه، داده های آزمایشی محتوای رطوبتی را با یک مدل سینتیکی برآزش نمودند. این مدل نیز فرم اصلاح شده ای از مدل کروکیدا و به شکل  $MR = a \exp(-b.t)$  بود (Ngadi et al., 2007).

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 <sup>a</sup>	۰/۵۲±۰/۰۸ <sup>b</sup>
۱۷۰	۷	۰/۵±۰/۱۱ <sup>b</sup>	۰/۴±۰/۰۵ <sup>c</sup>
۱۷۰	۱۰	۰/۲۶±۰/۱۳ <sup>e</sup>	۰/۲±۰/۰۸ <sup>f</sup>
۱۹۰	۵	۰/۴۶±۰/۰۱ <sup>c</sup>	۰/۳۴±۰/۰۹ <sup>d</sup>
۱۹۰	۷	۰/۲۸±۰/۰۱ <sup>e</sup>	۰/۲۳±۰/۰۸ <sup>ef</sup>
۱۹۰	۱۰	۰/۱۶±۰/۰۲ <sup>g</sup>	۰/۱۲±۰/۰۲ <sup>g</sup>

### مدل سازی محتوای رطوبتی قطعات سیب زمینی

با تعیین مدل مناسب می توان 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 می کند و این مساله بیانگر اهمیت بالای چنین مدلهایی است. بر اساس نتایج که نمونه ای از آن در جدول ۶ ارائه شده است، در تمام دماها، سطوح

جدول ۶- مقادیر ارزیابی مدل ها در دمای ۱۷۰°C، فرکانس ۲۰kHz و زمان سرخ کردن ۵ دقیقه

مدل ریاضی	$R^2$	$\chi^2$	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
$MR = a.b.t^2$	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
$MR = \frac{\exp(-a.t)}{t+a}$	۰/۸۵	۰/۲۵	۰/۰۲۴	۱۰/۱۱
$MR = \frac{1-b.t}{b.t+a}$	۰/۹۳	۰/۲۴	۰/۰۱۹	۱۵/۱۳

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

فرکانس		۲۰					۴۰				
دما(°C)	زمان(min)	a	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	P-value (%)	a	$R^2$	$\chi^2$	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)

دما (°C)	زمان (min)	فرکانس (kHz)	
		۲+	۴+
۱۷۰	۵	۰/۱۶±۰/۰۳ <sup>f</sup>	۰/۰۹±۰/۰۱ <sup>h</sup>
۱۷۰	۷	۰/۲۴±۰/۰۱ <sup>c</sup>	۰/۱۸±۰/۰۳ <sup>e</sup>
۱۷۰	۱۰	۰/۲۹±۰/۰۳ <sup>a</sup>	۰/۲۴±۰/۰۲۱ <sup>c</sup>
۱۹۰	۵	۰/۱۳±۰/۰۱ <sup>g</sup>	۰/۰۷±۰/۰۱۳ <sup>n</sup>
۱۹۰	۷	۰/۲۲±۰/۰۳ <sup>d</sup>	۰/۱۴±۰/۰۱۱ <sup>g</sup>
۱۹۰	۱۰	۰/۲۶±۰/۰۲ <sup>b</sup>	۰/۱۷±۰/۰۱۳ <sup>ef</sup>

واقع در دماهای بالاتر، روغن طی فرآیند سرخ کردن باعث ایجاد یک پوسته سخت و محکم تر بر سطح خارجی ماده غذایی می‌شود 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 تقریباً یکسان، زمان بیشتری نیاز می‌باشد. بنابراین، با افزایش زمان سرخ کردن، جذب روغن می‌تواند افزایش یابد (Moyano and Berna, 2002). نمونه‌های پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان ۵ دقیقه، دارای کمترین میزان جذب روغن بودند.

### مدل سازی جذب روغن در قطعات سیب زمینی

با توجه به نتایج که نمونه‌ای از آن در جدول ۹ بیان شده‌است، در تمام دماها، سطوح مختلف فرکانس و زمان‌های مختلف سرخ کردن، مدل  $O = \frac{a \cdot b \cdot t}{1 + b \cdot t}$  به علت داشتن بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$ ، RMSE و P-value بهترین برآزش را نشان داد. بمنظور محاسبه ضرایب مدل مذکور، تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره مطابق جدول ۱۰ انجام شد. در تابع مذکور میزان جذب روغن به عنوان تابعی از زمان سرخ کردن 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

جدول ۱۱، مقایسه‌ی میانگین تاثیر متقابل سه عامل زمان × فرکانس × دما را بر متوسط ضریب انتشار مؤثر رطوبت نمونه‌ها نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۸ در زمان‌های سرخ کردن یکسان، نمونه‌های پیش تیمار 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 پیش تیمار 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 فرآیند سرخ کردن 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 سرخ کردن در نظر گرفته شد، مشخص گردید که دماهای بالای سرخ کردن باعث کاهش جذب روغن می‌شود. بسیاری از محققین نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابهی دست یافتند (Moyano and Pedreschi, 2006; Ziaifar et al., 2010).

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

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

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

فرکانس (kHz)											
۲۰						۴۰					
دما(°C)	زمان(min)	a	b	R <sup>۲</sup>	χ <sup>۲</sup>	RMSE	a	b	R <sup>۲</sup>	χ <sup>۲</sup>	RMSE
۱۷۰	۵	۱/۵	-/۴۵	۰/۹۸	۰/۱۴	۰/۰۱۴	۱/۱۴	۰/۵۱	۰/۹۹	-/۱۲	-/۰۱۲
۱۷۰	۷	۱/۲	-/۱۵	۰/۹۹	۰/۱۵	-/۰۴۱	۲/۲۴	۰/۱۲	۰/۹۹	-/۱۴	-/۰۱۴
۱۷۰	۱۰	۲/۱	-/۴۱	۰/۹۹	۰/۱۴	-/۰۲۱	۱/۱۵	۰/۴۱	۰/۹۸	-/۲۱	-/۰۲۱
۱۹۰	۵	۲/۲	-/۲۳	۰/۹۸	۰/۱۶	-/۰۱۵	۱/۱۴	۰/۲۱	۰/۹۹	-/۱۸	-/۰۱۴
۱۹۰	۷	۲/۱	-/۲۸	۰/۹۹	۰/۱۲	-/۰۲۱	۲/۲۱	۰/۱۲	۰/۹۹	-/۱۷	-/۰۱۱
۱۹۰	۱۰	۳/۲	-/۲۵	۰/۹۹	۰/۱۱	-/۰۱۴	۱/۱۱	۱/۲۱	۰/۹۸	-/۱۸	-/۰۱۴

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

فرکانس (kHz)	دما (°C)	زمان (min)	ضریب انتشار موثر رطوبت (m <sup>2</sup> /s)
۴۰	۱۹۰	۵	۸/۸۰×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۹e</sup>
۴۰	۱۹۰	۷	۸/۶۳×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۹a</sup>
۴۰	۱۹۰	۱۰	۸/۲۵×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۹b</sup>
۴۰	۱۷۰	۵	۸/۳۳×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۹b</sup>
۴۰	۱۷۰	۷	۸/۰۳×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۹c</sup>
۴۰	۱۷۰	۱۰	۷/۸۷×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱/۱×۱۰ <sup>-۱۰c</sup>
۲۰	۱۹۰	۵	۷/۷۳×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱/۱×۱۰ <sup>-۱۰cd</sup>
۲۰	۱۹۰	۷	۷/۵۰×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱/۱×۱۰ <sup>-۱۰d</sup>
۲۰	۱۹۰	۱۰	۷/۳۸×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱/۱×۱۰ <sup>-۱۰d</sup>
۲۰	۱۷۰	۵	۷/۴۱×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۹d</sup>
۲۰	۱۷۰	۷	۷/۲۸×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۹e</sup>
۲۰	۱۷۰	۱۰	۶/۹۵×۱۰ <sup>-۸</sup> ± ۱×۱۰ <sup>-۱۰f</sup>

دمای ۸۵°C به مدت ۳ دقیقه و نمونه های آنزیم بری شده و خشک شده با هوای داغ در دمای ۶۰°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 به آسانی امکان پذیر نیست زیرا مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت نمونه های سرخ شده، تحت تاثیر عواملی مانند نوع فرآیند سرخ کردن (تحت فشار اتمسفری یا خلاء)، نوع ماده غذایی، وارسته سیب زمینی مورد آزمایش، دما، زمان سرخ کردن، شکل، ضخامت نمونه ها و پیش تیمارهای انجام شده تغییر می کند (Dehghan- Troncoso & Pedreschi, 2009). (Nasir et al., 2011 ;

#### انرژی فعال سازی

جدول ۱۲، مقایسه ی میانگین تاثیر متقابل سه عامل زمان × فرکانس × دما را بر متوسط انرژی فعال سازی نمونه ها نشان می دهد.

با توجه به جدول ۱۱، در زمان های ابتدایی فرآیند سرخ کردن، به دلیل وجود رطوبت کافی در بخش مرکزی نمونه ها، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت بالا بود اما با گذشت زمان سرخ کردن و کاهش آهنگ خروج رطوبت از نمونه ها، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت کاهش یافت. با توجه به نتایج، نمونه های پیش تیمار شده با اولتراسوند در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و در مدت زمان ۵ دقیقه سرخ کردن، بالاترین ضریب انتشار موثر رطوبت (m<sup>2</sup>/s) ۸/۸۰×۱۰<sup>-۸</sup> را داشتند. علت را می توان ایجاد کانال های میکروسکوپی بیشتر در قطعات سیب زمینی طی انجام پیش تیمار اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز نسبت داد. این فرآیند سبب می شود طی سرخ کردن، رطوبت با سهولت و سرعت بیشتری از نمونه ها خارج شده و در نتیجه میزان ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش یابد.

Pedreschi و Troncoso (۲۰۰۹) در تحقیقات خود فرآیند از دست دادن آب و جذب روغن را حین سرخ کردن عمیق ورقه های سیب زمینی پیش تیمار شده (نمونه های آنزیم بری شده در آب داغ در

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 <sup>a</sup>	۱۰	۱۷۰	۴۰
۱۶/۳۱۶±۲/۳۱ <sup>a</sup>	۷	۱۷۰	۴۰
۱۶/۱۰۸±۲/۰۷ <sup>a</sup>	۵	۱۷۰	۴۰
۱۵/۹۸۳±۲/۷۱ <sup>b</sup>	۱۰	۱۹۰	۴۰
۱۵/۴۰۵±۲/۴۱ <sup>b</sup>	۷	۱۹۰	۴۰
۱۵/۰۲۱±۲/۳ <sup>b</sup>	۵	۱۹۰	۴۰
۱۴/۷۶۱±۲/۵ <sup>c</sup>	۱۰	۱۷۰	۲۰
۱۴/۱۱۷±۲/۴ <sup>d</sup>	۷	۱۷۰	۲۰
۱۳/۷۴۳±۱/۷۱ <sup>ef</sup>	۵	۱۷۰	۲۰
۱۳/۵۶۸±۲/۰۵ <sup>fg</sup>	۱۰	۱۹۰	۲۰
۱۳/۳۸۷±۱/۱۸ <sup>g</sup>	۷	۱۹۰	۲۰
۱۳/۱۶۱±۲/۱ <sup>h</sup>	۵	۱۹۰	۲۰

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 مؤثر رطوبت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان ۵ دقیقه و بیشترین و بیشترین 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  $m^2/s$   $10^{-8}$  تا  $10^{-6}$  و برای انرژی فعال‌سازی  $kJ/mol$   $10^{-1}$  تا  $10^{-2}$  بود. همچنین نمونه‌های پیش‌تیمار شده در فرکانس ۴۰ kHz، از کمترین میزان جذب روغن نسبت به نمونه‌های پیش‌تیمار شده در فرکانس ۲۰ kHz برخوردار بودند. بیشترین میزان جذب روغن در فرکانس ۲۰ kHz، دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و طی سرخ کردن به مدت ۱۰ دقیقه بدست آمد. بر اساس نتایج، این‌که مدل‌نمایی بهترین برآزش را به‌منظور بررسی تغییرات محتوای رطوبت و جذب روغن قطعات سیب‌زمینی نشان داد.

با توجه به رابطه معکوس بین محتوای رطوبتی و انرژی فعال‌سازی می‌توان بیان کرد که مفادیر انرژی فعال‌سازی بالا، معمولاً در مواد با محتوای رطوبت پایین‌تر بدست می‌آید (Saravacos & Maroulis, 2001). بیشترین مقدار انرژی فعال‌سازی (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 مؤثر رطوبت و در نتیجه روی مقدار انرژی فعال‌سازی می‌باشد. زیرا میزان انرژی فعال‌سازی از طریق رسم نمودار لگاریتم طبیعی ضریب انتشار مؤثر 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 مؤثر رطوبت، مقدار انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای خارج شدن آب از قطعات سیب زمینی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند (Ngadi et al., 2007). از طرفی زمان فرآیند سرخ‌کردن نیز می‌تواند از عوامل تاثیرگذار بر روی میزان انرژی فعال‌سازی باشد. به طوری که در زمان‌های ابتدایی فرآیند سرخ‌کردن، به دلیل وجود رطوبت کافی در بخش مرکزی نمونه‌ها، مقدار انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای خارج شدن آب پایین می‌باشد (مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت بالا) ولی با گذشت زمان سرخ‌کردن و کاهش آهنگ خروج رطوبت از نمونه‌ها، مقدار انرژی فعال‌سازی لازم



- 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 dedhydration pretreatment on quality of french fries. *Journal of Food Engineering*, 49 (4), 339-345.
- Lisinska, G. and Leszczynski, 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.
- 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.
- Ziaifar, 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.

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

F. Roushani<sup>1</sup>, S. Movahed<sup>2\*</sup>, H. Ahmadi Chenarbon<sup>3</sup>

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- Assistant 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 ( $R^2=0.99$ ).

**Conclusion:** 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.

Archive of SID