

## تأثیر پیش تیمار با فراصوت و آنزیم‌بری روی جذب روغن سیب‌زمینی طی سرخ کردن عمیق

الهام رزاق پور<sup>۱</sup>، جلال دهقان نیا<sup>۲\*</sup>، بابک قنبرزاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز  
۲- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز  
\* نویسنده مسئول (J\_dehghannya@tabrizu.ac.ir)  
۳- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

### چکیده

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۲۰  
تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۹

### واژه‌های کلیدی

آنزیم‌بری  
جذب روغن  
سرخ کردن  
فراصوت  
مدل‌سازی

هدف این تحقیق، بررسی تأثیر پیش تیمارهای فراصوت و آنزیم‌بری بر میزان جذب روغن و مدل‌سازی جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی بود. پیش تیمار فراصوت تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دو زمان ۲۰ و ۴۰ دقیقه و پیش تیمار آنزیم‌بری در آب داغ با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ و ۴ دقیقه اعمال شد. سپس سرخ کردن در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه صورت گرفت. در این مطالعه از ۴ مدل تجربی پیشنهادی و دو مدل تجربی موجود در منابع، برای مدل‌سازی جذب روغن به صورت تابعی از زمان استفاده گردید. محتوای روغن علاوه بر زمان، به صورت تابعی از محتوای رطوبت، دانسیته و چروکیدگی نیز مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های پیش تیمار شده با آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه و دمای سرخ کردن ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، کمترین میزان جذب روغن را داشتند. همچنین، تلفیق پیش تیمار فراصوت تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه با پیش تیمار آنزیم‌بری باعث کاهش جذب روغن، در دماهای سرخ کردن ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد گردید. به علاوه، مدل‌های تجربی، به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش نمودند. با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، روابطی نیز برای تعیین ضرایب مدل‌های جذب روغن جهت کاربرد در شرایط مختلف فرآیند سرخ کردن به دست آمدند.

### مقدمه

غذایی، منشاء روغن، ترکیب شیمیایی روغن و موارد دیگر می‌باشد (Mir-Bel et al., 2009). به منظور تولید محصولات سرخ شده با محتوای روغن پایین، شناخت مکانیسم‌های موجود طی فرآیند سرخ کردن عمیق، به‌ویژه مکانیسم جذب روغن ضروری می‌باشد. در طول مراحل اولیه سرخ کردن (حدود ۴۰ ثانیه)، محتوای کل روغن ماده غذایی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و سپس تقریباً در طول سرخ کردن

سرخ کردن یکی از قدیمی‌ترین و معمول‌ترین واحدهای عملیاتی و یک فرآیند آبرگیری از مواد غذایی است که در آن خروج آب همراه با تغییر حالت صورت می‌گیرد و در مقابل روغن توسط ماده غذایی جذب می‌شود (Bouchon, 2009). میزان جذب روغن، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند شرایط فرآیند (دما و زمان)، پیش تیمارها، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ماده

شدن آنزیم پکتین‌متیل‌استراز شده و پیوند متیل با گروه کربوکسیلیک شکسته شده و گروه کربوکسیلیک با یون‌های کلسیم پیوند داده و منجر به استحکام بافت و کاهش تخلخل و در نهایت کاهش میزان جذب روغن می‌گردد (Aguilar *et al.*, 1997). از طرف دیگر، امروزه استفاده از امواج فراصوت به منظور بهینه‌سازی فرآیند و بهبود کیفیت مواد غذایی گسترش یافته است. تحقیقاتی در زمینه استفاده از پیش‌ تیمار فراصوت در فرآیند خشک کردن انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که پیش‌ تیمار فراصوت از طریق انقباض و انبساط‌های پی در پی باعث ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ماده غذایی شده و خروج آب از داخل محصول را تسهیل می‌کند. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه استفاده از پیش‌ تیمار فراصوت در فرآیند سرخ کردن صورت نگرفته است ولی انتظار می‌رود به دلیل شباهت فرآیندهای خشک کردن و سرخ کردن، استفاده از پیش‌ تیمار فراصوت قبل از فرآیند سرخ کردن، باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و کاهش زمان فرآیند شده و در نتیجه خصوصیات کیفی ماده غذایی بهبود یابد (Fernandes *et al.*, 2009).

در پژوهشی، Pedreschi و همکاران (۲۰۰۹)، سینتیک جذب و توزیع روغن در ساختار قطعات سیب‌زمینی پیش‌ تیمار شده با آنزیم‌بری در طول سرخ کردن را مورد بررسی قرار دادند. بر خلاف انتظار، سیب‌زمینی‌های آنزیم‌بری شده روغن بیشتری را نسبت به نمونه‌های شاهد جذب کردند که این امر احتمالاً به دلیل تغییرات ساختاری میکروسکوپی در بافت سیب‌زمینی باشد. Pedreschi و Moyano (۲۰۰۶) نیز میزان جذب روغن را در قطعات سیب‌زمینی آنزیم‌بری شده، آنزیم‌بری و خشک شده و شاهد، طی سرخ کردن مورد مطالعه قرار دادند. میزان جذب روغن در نمونه آنزیم‌بری و خشک شده کمتر از سایر نمونه‌ها بود. این نتایج نشان می‌دهند که در نمونه‌های آنزیم‌بری و سپس خشک شده، یک لایه خارجی در طول سرخ شدن تشکیل می‌شود که مقاومت در مقابل جذب روغن را افزایش داده و در نتیجه جذب روغن کاهش می‌یابد. همچنین، خشک کردن، محتوای رطوبتی اولیه را کاهش داده و یک

ثابت باقی می‌ماند (Pedreschi *et al.*, 2008). بعد از فرآیند سرخ کردن و هنگام سرد شدن، بخارات موجود در خلل و فرج ماده غذایی کندانس شده و حدود ۶۵ درصد روغن موجود در سطح ماده غذایی جذب می‌شود (Ufheil & Escher, 1996; Pedreschi *et al.*, 2008). Bouchon و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند که سه بخش<sup>۱</sup> روغنی مختلف می‌تواند در نتیجه مکانیسم‌های مختلف جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن شناخته شود:

۱- روغن ساختاری<sup>۲</sup>: نشان‌دهنده میزان روغن جذب شده حین فرآیند سرخ کردن می‌باشد.  
 ۲- روغن سطحی نفوذ کرده<sup>۳</sup>: بیانگر میزان روغن جذب شده به داخل ماده غذایی حین سرد کردن (بعد از خارج کردن ماده غذایی از داخل سرخ کن) است.

۳- روغن سطحی<sup>۴</sup>: نشان‌دهنده میزان روغن باقیمانده روی سطح محصول سرخ شده می‌باشد.

در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای کاهش جذب روغن در مواد غذایی سرخ شده پیشنهاد شده است (Rubnov & Saguy, 1997) که از جمله این فرآیندهای مکمل می‌توان به استفاده از پیش‌ تیمارهایی مثل خشک کردن مقدماتی (Lamberg *et al.*, 1990; Moyano *et al.*, 2002) استفاده از پوشش‌های خوراکی (Williams & Mittal, 1999)، آبگیری اسمزی (Bunger *et al.*, 2003)، مایکروویو، امواج فراصوت و آنزیم‌بری قبل از فرآیند سرخ کردن اشاره کرد (Pedreschi *et al.*, 2008). پیش‌ تیمار آنزیم‌بری به منظور بهبود رنگ و بافت ورقه‌های سیب‌زمینی و کاهش جذب روغن به کار برده می‌شود. طی پیش‌ تیمار آنزیم‌بری، نشاسته سطحی ژلاتینه شده و این پدیده موجب کاهش جذب روغن در فرآیند سرخ کردن می‌گردد (Califano & Calvelo, 1987). از طرف دیگر، برخی محققان گزارش کرده‌اند که آنزیم‌بری در دمای پایین (۷۰-۵۵ درجه سانتی‌گراد) در حضور کلرید کلسیم، باعث فعال

- 1-Oil fraction
- 2- Structure oil
- 3- Penetrated surface oil
- 4- Surface oil

### تجهیزات

سرخ کن مورد استفاده در این تحقیق، سرخ کن خانگی (Moulinex)، مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد، دارای محفظه ضد زنگ و سبد جداشونده، آون کنوکسیون (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن-آزمایگر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) جهت اندازه گیری مقدار رطوبت نمونه ها، حمام فراصوت (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان فرآیند) برای اعمال امواج فراصوت و برای آنزیم بری نیز از بن ماری (مدل WM22 ساخت شرکت فن-آزمایگر) استفاده شد.

### آماده سازی نمونه ها

برای تهیه نمونه ها، سیب زمینی ها پس از شستشو و پوست گیری، با استفاده از یک چاقوی دستی به قطعات مکعب مستطیلی شکل با ابعاد ۱/۲×۱/۲×۴ سانتی متر، برش داده شدند و جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شده و سپس رطوبت اضافی با کاغذ رطوبت گیر گرفته شد. در مرحله بعد نمونه های پیش تیمار شده مطابق جدول ۱ تهیه شدند.

### شرایط سرخ کردن

سرخ کردن سیب زمینی ها در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه انجام شد. پس از آماده سازی نمونه ها (مطابق جدول ۱)، دستگاه سرخ کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شده و دما و زمان سرخ کن تنظیم شد. با رسیدن دمای روغن به دمای مورد نظر، ۱۲۰-۱۰۰ گرم از نمونه ها در داخل سبد مشبک سرخ کن قرار داده شد و پس از رسیدن به زمان مورد نظر از سرخ کن بیرون آورده شدند. سپس، روغن سطحی نمونه ها با کاغذ جاذب گرفته شده و جهت انجام آزمایش های مربوطه آماده گردیدند. تمامی آزمایش ها در دو تکرار انجام شدند.

روش مؤثر در کاهش جذب روغن است. علاوه بر این، Rimac و همکاران (۲۰۰۴)، تأثیر پیش تیمارهای آنزیم بری در محلول های کلرید کلسیم یا اسیدسیتریک و همچنین، پوشش دادن در محلول کربوکسی متیل سلولز را بر روی جذب روغن در سرخ کردن سیب زمینی بررسی کردند. بهترین نتیجه، در نمونه های آنزیم بری شده در محلول کلرید کلسیم و سپس غوطه ور شده در محلول کربوکسی متیل سلولز مشاهده شد که در آن محتوای روغن تا ۵۴٪ کاهش یافت.

به منظور افزایش کیفیت نهایی محصول، روند تغییرات ماده غذایی طی فرآیند سرخ کردن را می توان با استفاده از مدل سازی مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال، مدل های جذب روغن، روابط بین متغیرهای میزان روغن و زمان را نشان می دهد؛ به طوری که از طریق این مدل ها می توان میزان جذب روغن در زمان های مختلف فرآیند و همچنین، آهنگ جذب روغن توسط ماده غذایی را به دست آورد. Pedreschi و Moyano (۲۰۰۶) و Krokida و همکاران (۲۰۰۰)، از دو مدل سینتیکی برای جذب روغن در فرآیند سرخ کردن استفاده کردند. نتایج نشان داد که این دو مدل تجربی به خوبی داده های آزمایشی را برازش می کنند.

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پیش تیمارهای آنزیم بری و فراصوت بر روی میزان جذب روغن و همچنین، مدل سازی جذب روغن در طول سرخ کردن قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده بود.

### مواد و روش ها

#### مواد

مواد خام مورد استفاده در این تحقیق، سیب زمینی و روغن مایع بود. سیب زمینی از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایش ها در سردخانه بالای صفر نگهداری شد. روغن مورد استفاده در این مطالعه، روغن مایع مخصوص سرخ کردن (روغن بهار)، مخلوطی از روغن های آفتابگردان، سویا و پنبه دانه بود.

## آزمایش‌ها

## محتوای رطوبت

رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری شد (AOAC ۱۹۹۰) و بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید.

محتوای رطوبت، با خشک کردن نمونه‌ها در آن کنوکسیون در دمای  $105 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد تا

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	۱
U20	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه	۲
U40	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۴۰ دقیقه	۳
B2	آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه	۴
B4	آنزیم‌بری به مدت ۴ دقیقه	۵
U20 - B2	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه - آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه	۶
U20 - B4	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه - آنزیم‌بری به مدت ۴ دقیقه	۷
U40 - B2	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۴۰ دقیقه - آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه	۸
U40 - B4	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۴۰ دقیقه - آنزیم‌بری به مدت ۴ دقیقه	۹

۱: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دما و زمان مورد نظر (دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه) سرخ شدند.

۲ و ۳: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار فراصوت، در حمام فراصوت در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ و ۴۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار آنزیم‌بری، در بن‌ماری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۲ و ۴ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش‌تیمارهای فراصوت و آنزیم‌بری، ابتدا در حمام فراصوت در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ و ۴۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند و سپس در دستگاه بن‌ماری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ و ۴ دقیقه به طور مجزا آنزیم‌بری شدند.

## محتوای روغن

سنجش میزان روغن نمونه‌های سرخ شده، به وسیله استخراج روغن نمونه‌ها در دستگاه سوکسله با حلال پترولیوم اتر (AOAC ۱۹۹۵) صورت گرفت و نتایج بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

## میزان چروکیدگی

برای به دست آوردن چروکیدگی ابتدا حجم ظاهری اولیه نمونه‌ها قبل از سرخ کردن ( $V_0$ ) و حجم ظاهری ثانویه ( $V_t$ ) بعد از سرخ کردن، با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد (Ziaifar et al., 2010):

رابطه (۱)

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho}$$

در رابطه فوق،  $V$ : حجم ظاهری ( $\text{cm}^3$ )،  $M$ : وزن نمونه ( $\text{gr}$ )،  $M_1$ : وزن پیکنومتر خالی و حلال ( $\text{gr}$ ).

$M_2$ : وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال ( $\text{gr}$ ) و  $\rho$ : دانسیته تولوئن ( $\text{kg/m}^3$ ) می‌باشند. سپس با استفاده از رابطه ۲، میزان چروکیدگی در هر لحظه تعیین شد (Ziaifar et al., 2010):

رابطه (۲)

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

در رابطه ۲،  $S_{(T)}$ : درصد چروکیدگی،  $V_0$ : حجم ظاهری نمونه خام ( $\text{cm}^3$ ) و  $V_t$ : حجم ظاهری نمونه پس از سرخ شدن ( $\text{cm}^3$ ) می‌باشد.

## دانسیته ظاهری

بعد از محاسبه حجم ظاهری نمونه‌ها، از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ شده، مقادیر دانسیته ظاهری به صورت گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد (Ziaifar et al., 2010):

رابطه (۳)

$$\rho = \frac{M}{V}$$

در این رابطه،  $\rho$ : دانسیته ظاهری محصول  
 $M$ : جرم محصول (g) و  $V$ : حجم ظاهری  
 محصول ( $cm^3$ ) می‌باشد.

### مدل‌سازی ریاضی

مدل‌های به‌کار برده شده در این تحقیق، مدل تجربی Pedreschi و Moyano (۲۰۰۶) و همچنین مدل پیشنهاد شده توسط Krokida و همکاران (۲۰۰۰)، برای پیش‌بینی روند جذب روغن بود (جدول ۳). علاوه بر این، ۴ مدل دیگر به عنوان مدل‌های پیشنهادی ارائه شدند (مدل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ جدول ۳) که از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار MATLAB (Version 7.12.0.635 R2011a) به دست آمدند. علاوه بر مدل‌های فوق، مدل‌سازی جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن عمیق به صورت تابعی از چروکیدگی، از دست دادن آب و دانسیته ظاهری نیز، با استفاده از چند مدل پیشنهادی صورت گرفت. ارزیابی مدل‌ها با استفاده از دو معیار ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد؛ به این صورت که مدل‌های دارای  $R^2$  بالاتر و RMSE پایین‌تر به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند. همچنین، ضرایب مدل‌های مختلف با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره در نرم‌افزار Excel 2007 به صورت تابعی از شرایط فرایند (دما، زمان فراصوت و زمان آنزیم‌بری) مدل‌سازی شدند.

### آنالیز آماری

در این تحقیق، آزمایش فاکتوریل بر مبنای طرح بلوک‌های کامل تصادفی برای بررسی اثر متقابل فاکتورها (آنزیم‌بری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در دو سطح زمانی ۲ و ۴ دقیقه و فراصوت تحت فرکانس

۴۰ کیلوهرتز در دو سطح زمانی ۲۰ و ۴۰ دقیقه) توسط نرم افزار SAS9.1 صورت گرفت. ۹ تیمار ذکر شده در جدول ۱ در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار ( $2 \times 3 \times 4 \times 9 = 216$ ) انجام شدند و تأثیر هر کدام از پیش‌تیمارها روی جذب روغن آنالیز شد. مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون بونفرونی<sup>۱</sup> در سطح احتمال ۵٪ (Steel *et al.*, 1997) انجام شد.

### نتایج و بحث

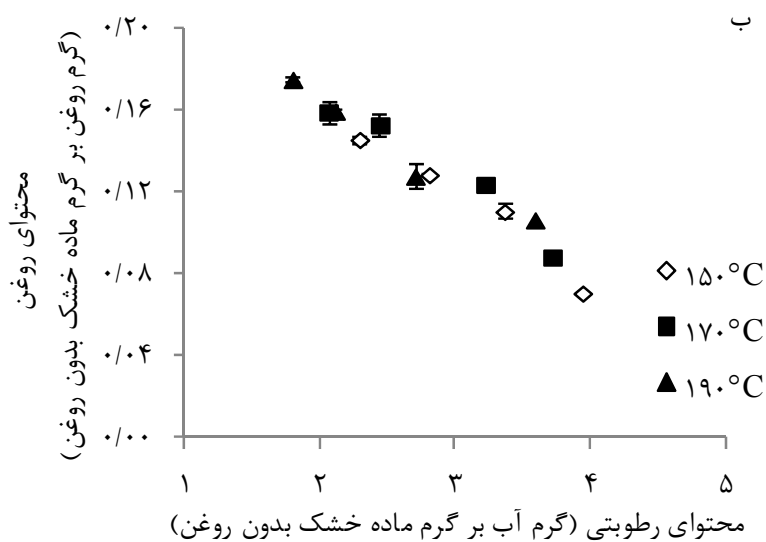
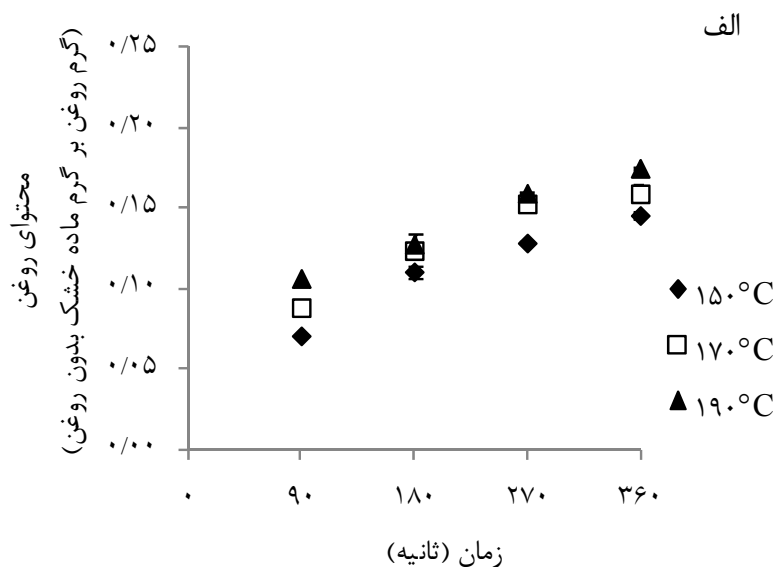
#### جذب روغن

شکل ۱- الف، محتوای روغن نمونه‌های شاهد را به صورت تابعی از زمان در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل و همچنین جدول ۲، افزایش دمای سرخ کردن در نمونه‌های شاهد، باعث افزایش غیرمعنی‌دار جذب روغن گردید ( $P > 0.05$ ). این افزایش در جذب روغن را می‌توان به از دست دادن رطوبت بیشتر در دماهای بالا و در زمان‌های سرخ کردن یکسان نسبت داد که در نهایت منجر به جذب روغن بیشتر به ماده غذایی می‌شود. این یافته با نتایج Krokida و همکاران (۲۰۰۱) و Math و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد. همچنین، با گذشت زمان در تمامی دماها، محتوای روغن نمونه‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۲) ولی با گذشت زمان و رسیدن به محتوای رطوبت تعادلی و تشکیل پوسته سخت، خروج رطوبت از محصول سخت شده، بنابراین، آهنگ جذب روغن کاهش یافته و به حالت تعادلی نزدیک شد (شکل ۱- الف). این نتایج در تطابق با یافته‌های Pedreschi و Moyano (۲۰۰۶) و Pedreschi و Troncoso (۲۰۰۹) می‌باشد. شکل ۱- ب، محتوای روغن نمونه‌های شاهد را به صورت تابعی از محتوای رطوبت در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با کاهش محتوای رطوبت، جذب روغن افزایش یافت. این نتیجه با یافته‌های Troncoso و Pedreschi (۲۰۰۶) مطابقت دارد.

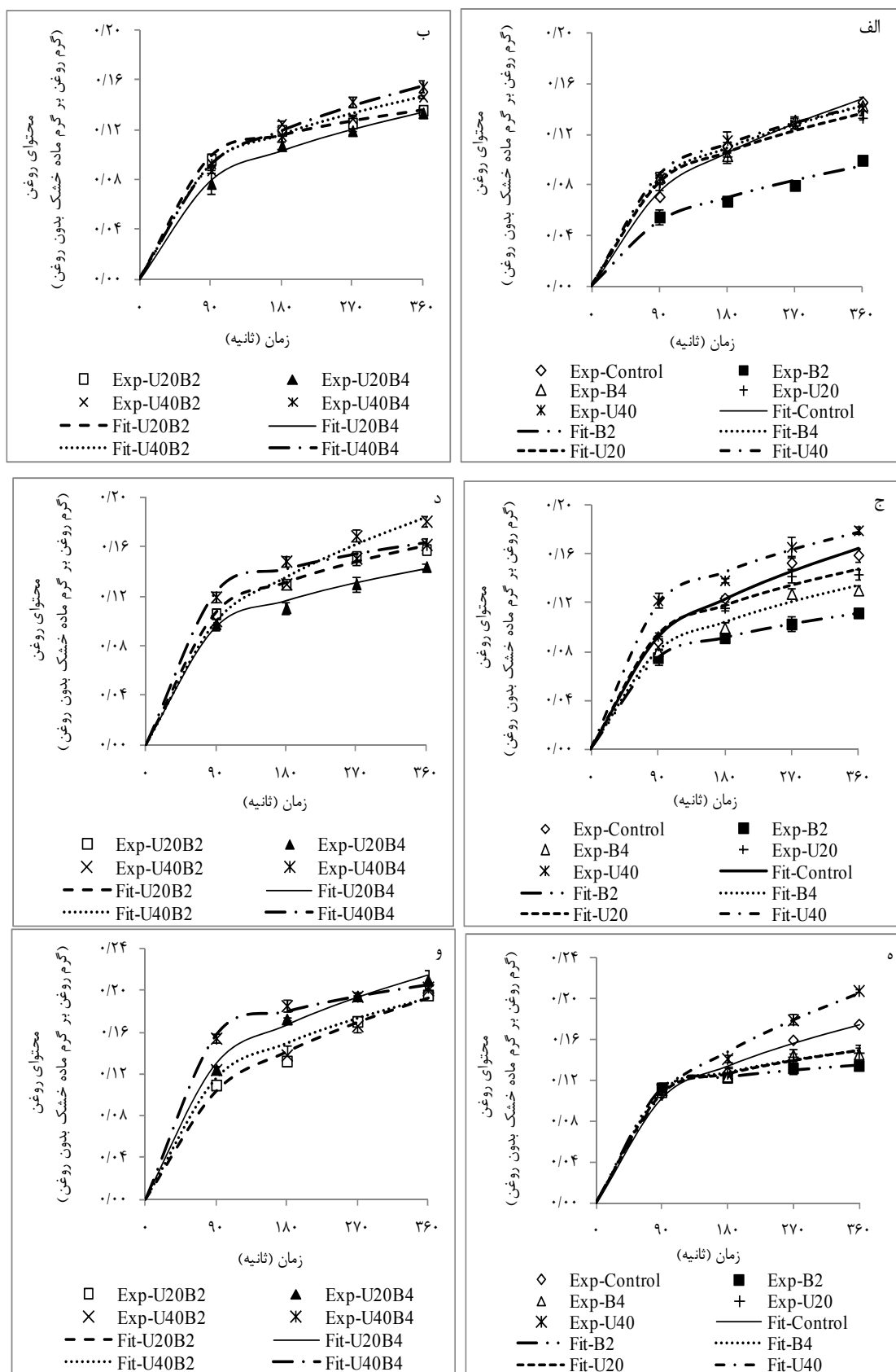
جدول ۲- اثر فاکتورهای زمان، دما، فراصوت و آنزیم‌بری بر روی محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق

زمان (ثانیه)	محتوای روغن***	دما (°C)	محتوای روغن***	فراصوت*	محتوای روغن**	آنزیم‌بری**	محتوای روغن***
۳۶۰	۰/۱۵۶۵ <sup>a</sup>	۱۹۰	۰/۱۳۵۰ <sup>a</sup>	۳	۰/۱۴۳۱ <sup>a</sup>	۱	۰/۱۲۹۲ <sup>a</sup>
۲۷۰	۰/۱۴۴۳ <sup>a</sup>	۱۷۰	۰/۱۲۸۹ <sup>a</sup>	۱	۰/۱۲۹۲ <sup>a</sup>	۳	۰/۱۱۸۹ <sup>a</sup>
۱۸۰	۰/۱۲۳۳ <sup>b</sup>	۱۵۰	۰/۱۱۲۵ <sup>a</sup>	۲	۰/۱۲۲۲ <sup>a</sup>	۲	۰/۰۹۸۸ <sup>b</sup>

\* ۱، ۲ و ۳ به ترتیب، نشان‌گر عدم انجام فراصوت (نمونه شاهد)، انجام فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه و انجام فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه می‌باشد.  
 \*\* ۱، ۲ و ۳ به ترتیب، نشان‌گر عدم انجام آنزیم‌بری (نمونه شاهد)، انجام آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه و انجام آنزیم‌بری به مدت ۴ دقیقه می‌باشد.  
 \*\*\* حروف لاتین متفاوت در یک ستون، نشان‌گر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ ( $P < 0.05$ ) می‌باشد.



شکل ۱- محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی سرخ شده (نمونه شاهد) به عنوان تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبت (ب) طی سرخ کردن عمیق در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲- تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۳ (جدول ۳) طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵۰ °C (الف، ب)، ۱۷۰ °C (ج، د) و ۱۹۰ °C (ه، و) در پیش تیمارهای مختلف

فراصوت نسبت داد که این امر احتمالاً باعث تخریب بافت سیب‌زمینی شده، همچنین در این مدت، نمونه‌ها آب بیشتری جذب کرده و رطوبت اولیه نمونه زیاد می‌شود. در نتیجه، هنگام سرخ شدن نیز روغن بیشتری جایگزین شده و محتوای روغن محصول افزایش می‌یابد. در ارتباط با کاهش جذب روغن در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آنزیم‌بری نسبت به نمونه شاهد، با توجه به شکل ۲-الف، می‌توان گفت که پیش‌تیمار آنزیم‌بری باعث ژلاتینه شدن نشاسته سطحی شده و این پدیده موجب کاهش جذب روغن می‌گردد (Califano & Calvelo, 1987). شکل ۲-ب، تغییرات محتوای روغن نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت (تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و زمان‌های ۲۰ و ۴۰ دقیقه) و آنزیم‌بری (در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۲ و ۴ دقیقه) به صورت تلفیقی و سپس سرخ شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست آمده، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه و سپس آنزیم‌بری شده به مدت ۲ و ۴ دقیقه، باعث افزایش جذب روغن نسبت به نمونه شاهد شد؛ اما این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود ( $P > 0.05$ ). نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه و سپس آنزیم‌بری شده به مدت ۴ دقیقه (به جز زمان سرخ کردن ۹۰ ثانیه)، جذب روغن کمتری نسبت به نمونه شاهد داشتند ولی این کاهش در جذب روغن از لحاظ آماری معنی‌دار نبود ( $P > 0.05$ ).

شکل ۲-ج، د، محتوای روغن نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت مجزا و تلفیقی و سپس سرخ شده در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها نیز روند داده‌های آزمایشی، مشابه دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود.

شکل ۲-ه، و، محتوای روغن نمونه‌های مختلف سرخ شده در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که داده‌های حاصل از پیش‌تیمارهای مجزا (شکل ۲-ه)، روندی مشابه داده‌های آزمایشی به‌دست آمده در دماهای ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد دارند. با توجه به شکل ۲-و، همه پیش‌تیمارهای تلفیقی باعث افزایش در جذب روغن نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شد و

شکل ۲-الف، منحنی تغییرات محتوای روغن را در زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه، در تیمار شاهد و نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز (به مدت ۲۰ و ۴۰ دقیقه) و آنزیم‌بری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد (به مدت ۲ و ۴ دقیقه) را به صورت مجزا و سپس سرخ شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

مطابق این شکل، با افزایش زمان سرخ کردن، محتوای روغن در تمامی پیش‌تیمارها، افزایش پیدا کرد. نمونه‌های شاهد در مقایسه با دیگر پیش‌تیمارها به جز پیش‌تیمار فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه و پیش‌تیمار فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه (فقط در زمان سرخ کردن ۹۰ ثانیه)، بیشترین میزان جذب روغن را در زمان‌های سرخ کردن یکسان از خود نشان دادند. همچنین، نمونه‌های آنزیم‌بری شده به مدت ۲ دقیقه کمترین میزان جذب روغن و نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه بالاترین میزان جذب روغن را از خود نشان دادند. قابل ذکر است که کاهش محتوای روغن در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه از لحاظ آماری معنی‌دار بود ولی اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آنزیم‌بری به مدت ۴ دقیقه، فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه و فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه نسبت به نمونه شاهد مشاهده نشد (جدول ۲).

مطابق شکل ۲-الف، کاهش محتوای روغن در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه را می‌توان به اثر امواج فراصوت در ایجاد انقباض و انبساط‌های متوالی و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی در بافت سیب‌زمینی نسبت داد که این امر خروج رطوبت از محصول را تسریع می‌کند؛ در نتیجه فشار بخار در داخل سیب‌زمینی، هنگام سرخ‌شدن، زیاد شده و با ممانعت از ورود روغن به داخل سیب‌زمینی، باعث کاهش میزان روغن ساختاری می‌گردد (Ufheil & Escher, 1996; Bouchon et al., 2003; Pedreschi et al., 2008; Debnath et al., 2009). افزایش میزان جذب روغن در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت، تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۴۰ دقیقه را نیز می‌توان به طولانی بودن مدت زمان اعمال امواج



۴) برازش کرد. مدل‌های دیگر نیز به خوبی داده‌های آزمایشی جذب روغن را برازش نمودند (جدول ۴).  
مدل‌سازی میزان جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن عمیق، به صورت تابعی از چروکیدگی ( $S(t)$ )، محتوای رطوبت بدون بعد ( $M_t$ ) و دانسیته ظاهری ( $\rho$ ) نیز با استفاده از چند مدل پیشنهادی صورت گرفت که این مدل‌ها با داشتن  $R^2$  بالا و RMSE پایین، به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش نمودند (جدول ۵). همه پیش‌تیمارها به جز پیش‌تیمار فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه، باعث کاهش چروکیدگی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد شدند. علاوه بر این، کمترین میزان نسبت محتوای رطوبت در بین نمونه‌های مختلف، مربوط به پیش‌تیمار آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه بود و تمامی پیش‌تیمارهای اعمال شده، دانسیته ظاهری نمونه‌ها را نسبت به نمونه شاهد کاهش دادند (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).

بیشترین میزان جذب روغن، متعلق به نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه و سپس آنزیم‌بری شده به مدت ۴ دقیقه می‌باشد که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). در حالت کلی با مقایسه نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت مجزا و در دماهای مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌تیمار آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه و دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، نتیجه بهتری در کاهش جذب روغن حاصل کرد.

#### مدل‌سازی جذب روغن

شکل ۲، منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن نمونه‌های مختلف (بر اساس جدول ۱) را با مدل ۳ جدول ۳، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه نشان می‌دهد. مدل شماره ۳ به خوبی داده‌های آزمایشی را با میزان  $R^2$  بالا و RMSE پایین (جدول

جدول ۳- مدل‌سازی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان

مرجع	مدل	شماره مدل
پیشنهادی	$o = t \exp(at + b)$	۱
پیشنهادی	$o = at / (t + b)$	۲
پیشنهادی	$o = at^b$	۳
پیشنهادی	$o = \exp(-at^b)$	۴
Moyano & Pedreschi, 2006	$o = abt / (1 + bt)$	۵
Krokida et al., 2000	$o = a(1 - \exp(-bt))$	۶

جدول ۴- داده‌های آماری حاصل برای مدل‌های ۱-۶ جدول ۳ در دماها و تیمارهای مختلف

مدل ۱	دما ( $^{\circ}C$ )					
	۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰	
	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$
Control	۰/۰۰۹۴	۰/۹۸	۰/۰۰۷۸	۰/۹۹	۰/۰۰۷۶	۰/۹۸
U20	۰/۰۱۲۵	۰/۹۸	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹
U40	۰/۰۱۳۰	۰/۹۸	۰/۰۱۵۳	۰/۹۷	۰/۰۰۶۷	۰/۹۹
B2	۰/۰۱۲۲	۰/۹۷	۰/۰۰۷۶	۰/۹۸	۰/۰۰۸۴	۰/۹۶
B4	۰/۰۱۱۲	۰/۹۷	۰/۰۰۷۸	۰/۹۸	۰/۰۱۰۳	۰/۹۸
U20B2	۰/۰۱۴۲	۰/۹۷	۰/۰۰۹۳	۰/۹۸	۰/۰۰۹۰	۰/۹۸
U20B4	۰/۰۰۷۳	۰/۹۹	۰/۰۱۲۸	۰/۹۶	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹
U40B2	۰/۰۲۰۶	۰/۹۵	۰/۰۰۹۴	۰/۹۹	۰/۰۰۷۷	۰/۹۹
U40B4	۰/۰۱۳۷	۰/۹۸	۰/۰۱۰۹	۰/۹۸	۰/۰۰۹۵	۰/۹۸

دما (°C)						مدل ۲
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	Control
۰/۰۰۷۵	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۱۷	۰/۹۹	U20
۰/۰۰۹۰	۰/۹۹	۰/۰۰۷۷	۰/۹۹	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹	U40
۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۶۲	۰/۹۸	B2
۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	۰/۰۰۶۶	۰/۹۹	B4
۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹	U20B2
۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۰۶۴	۰/۹۴	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	U20B4
۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	۰/۰۰۶۵	۰/۹۸	۰/۰۰۴۷	۰/۹۸	U40B2
۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	U40B4

دما (°C)						مدل ۳
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	
۰/۰۰۲۵	۰/۹۹	۰/۰۰۵۱	۰/۹۹	۰/۰۰۵۲	۰/۹۹	Control
۰/۰۰۴۵	۰/۹۹	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	U20
۰/۰۰۴۸	۰/۹۹	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹	۰/۰۰۲۵	۰/۹۹	U40
۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۰۱	۱	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	B2
۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	۰/۰۰۵۲	۰/۹۹	۰/۰۰۴۴	۰/۹۹	B4
۰/۰۰۶۴	۰/۹۹	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	U20B2
۰/۰۰۵۲	۰/۹۹	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۲۸	۰/۹۹	U20B4
۰/۰۰۱۰	۰/۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	۰/۰۰۶۰	۰/۹۹	U40B2
۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۰۰۳۱	۰/۹۹	U40B4

دما (°C)						مدل ۴
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	
۰/۰۰۲۲	۰/۹۹	۰/۰۰۴۸	۰/۹۹	۰/۰۰۵۰	۰/۹۹	Control
۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	۰/۰۰۴۵	۰/۹۹	۰/۰۰۲۸	۰/۹۹	U20
۰/۰۰۶۸	۰/۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹	U40
۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	۰/۰۰۴۸	۰/۹۹	B2
۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	۰/۰۰۵۱	۰/۹۹	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	B4
۰/۰۰۷۹	۰/۹۹	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹	U20B2
۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹	U20B4
۰/۰۰۱۱۴	۰/۹۸	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	U40B2
۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۴۵	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹	U40B4

دما (°C)						مدل ۵
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	Control
۰/۰۰۷۵	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۱۷	۰/۹۹	U20
۰/۰۰۹۰	۰/۹۹	۰/۰۰۷۷	۰/۹۹	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹	U40
۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۶۲	۰/۹۸	B2
۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	۰/۰۰۶۶	۰/۹۹	B4
۰/۰۱۰۲	۰/۹۸	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹	U20B2
۰/۰۰۰۹	۱	۰/۰۰۶۴	۰/۹۹	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	U20B4
۰/۰۱۴۲	۰/۹۷	۰/۰۰۶۵	۰/۹۹	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	U40B2
۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	U40B4

دما (°C)						مدل ۶
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	
۰/۰۰۴۳	۰/۹۹	۰/۰۰۵۷	۰/۹۹	۰/۰۰۶۲	۰/۹۹	Control
۰/۰۰۹۸	۰/۹۸	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	U20
۰/۰۱۱۱	۰/۹۸	۰/۰۱۰۷	۰/۹۸	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	U40
۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۴۳	۰/۹۹	۰/۰۰۷۴	۰/۹۷	B2
۰/۰۰۶۵	۰/۹۹	۰/۰۰۶۵	۰/۹۹	۰/۰۰۸۳	۰/۹۸	B4
۰/۰۱۲۳	۰/۹۸	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹	U20B2
۰/۰۰۲۸	۰/۹۹	۰/۰۰۹۰	۰/۹۸	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	U20B4
۰/۰۱۷۲	۰/۹۶	۰/۰۰۷۹	۰/۹۹	۰/۰۰۵۰	۰/۹۹	U40B2
۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	۰/۰۰۷۳	۰/۹۹	U40B4

جدول ۵- مدل سازی تغییرات محتوای روغن بر حسب چروکیدگی، محتوای رطوبت بدون بعد و دانسیته ظاهری

مرجع	مدل	شماره مدل
پیشنهادی	$o = S_{(t)}(1 - \exp(-aS_{(t)}))$	۱
پیشنهادی	$o = a(1 - M_t^b)$	۲
پیشنهادی	$o = a\rho^2 + b\rho + c$	۳

جدول ۶- مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها

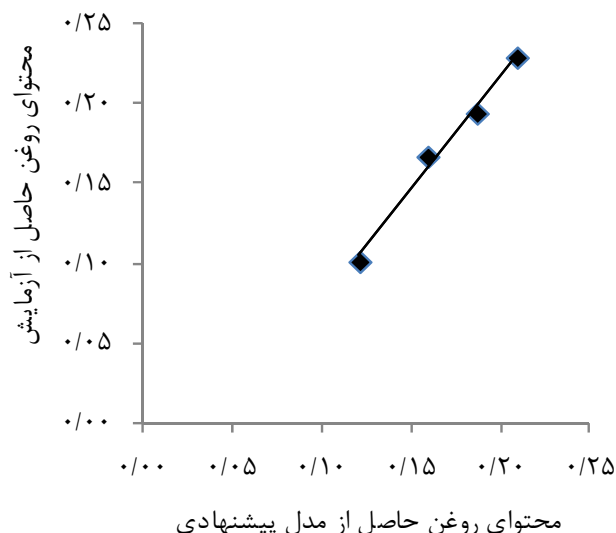
$R^2$	$o = t \exp(at + b)$
۰/۹۷۵۴	$a = ۲/۶۳E-۰۰۶U - ۹/۲E-۰۰۵B + ۱/۷E-۰۰۵T$
۰/۹۸۵۴	$b = -۰/۰۰۰۱۴U - ۰/۰۳۱۷۲B - ۰/۰۳۸۴۴T$
$R^2$	$o = at / (t + b)$
۰/۹۷۸۵	$a = ۰/۰۰۱۴۲۴U - ۰/۰۰۲۹۵B + ۰/۰۰۱۰۴۱T$
۰/۸۸۷۵	$b = ۰/۳۶۱۸U - ۴/۴۷۷B + ۰/۶۲۱۴۱T$
$R^2$	$o = at^b$
۰/۸۲۲۴	$a = -۰/۰۰۰۶۹U - ۰/۰۰۱۳B + ۰/۰۰۰۱۷T + ۰/۰۰۰۱۷۵UB + ۸/۹۷E-۰۰۸U^2$
۰/۹۲۲۶	$b = ۰/۰۰۳۷U - ۰/۰۱۱۲۵B + ۰/۰۰۱۸۶T - ۶/۵E-۰۰۷U^2$
$R^2$	$o = \exp(-at^b)$
۰/۹۳۷۱	$a = ۰/۰۱۲۲۶U - ۰/۱۴۶۳۹B + ۰/۰۲۹۱۲T$
۰/۹۳۳۷	$b = -۰/۰۰۰۹۴U + ۰/۰۰۵۹۵B - ۰/۰۰۰۹۱T$
$R^2$	$o = abt / (1 + bt)$
۰/۹۷۸۶	$a = ۰/۰۰۱۴۲۵U - ۰/۰۰۲۹۶B + ۰/۰۰۱۰۴۲T$
۰/۸۴۴۸	$b = -۸/۵E-۰۰۵U - ۰/۰۰۰۱۹B + ۰/۰۰۰۱۵T - ۴/۷E-۰۰۷T^2$
$R^2$	$o = a(1 - \exp(-bt))$
۰/۹۸۸۱	$a = ۰/۰۰۱۰۵۴U - ۰/۰۰۱۵۲B + ۰/۰۰۰۸۲۸T$
۰/۹۲۶۱	$b = -۲/۷E-۰۰۵U + ۰/۰۰۰۰۵B + ۵/۹۴E-۰۰۵T$

U، B و T به ترتیب نشان‌دهنده زمان پیش‌تیمار فراصوت، زمان پیش‌تیمار آنزیم‌بری و دمای سرخ کردن می‌باشند.

#### معتبرسازی مدل توسعه‌یافته پیشنهادی

به منظور معتبرسازی مدل توسعه‌یافته پیشنهادی، نتایج حاصل از برازش مقادیر محتوای روغن آزمایشی با زمان فراصوت ۳۰ دقیقه، آنزیم‌بری ۳ دقیقه و دمای سرخ کردن ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد با مقادیر محتوای روغن پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی ۳ (جدول ۳) در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست، بین محتوای روغن مدل ۳ و تیمار آزمایشی، انطباق خوبی ( $R^2 = ۰/۹۸۹$ ) وجود دارد.

همچنین، ضرایب مدل‌های جدول ۳ با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره به صورت تابعی از شرایط فرایند (دما، زمان فراصوت و زمان آنزیم‌بری) مدل‌سازی شدند (جدول ۶). با استفاده از این مدل‌ها می‌توان بدون انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر در همه دماها، زمان‌ها و شرایط مختلف فرایند، محتوای روغن محصول را به دست آورده و مناسب‌ترین شرایط را برای انجام فرایند سرخ کردن حاصل کرد.



شکل ۳- برآزش داده‌های محتوای روغن حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل پیشنهادی (مدل ۳ جدول ۳)

### نتیجه‌گیری

فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و مدت ۲۰ دقیقه با پیش تیمار آنزیم‌بری (۲ و ۴ دقیقه)، باعث کاهش جذب روغن در دماهای سرخ کردن ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد گردید. علاوه بر این، مدل‌های تجربی به دست آمده در این پژوهش به خوبی داده‌های آزمایشی را برآزش نمودند. همچنین، مدل‌هایی با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره برای تعیین ضرایب مدل‌های جذب روغن به دست آمدند که می‌توانند مدل‌های مفیدی جهت استفاده در فرآیند سرخ کردن عمیق بوده و از انجام آزمایش‌های پرهزینه جلوگیری نمایند.

میزان جذب روغن با افزایش دمای سرخ کردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. نمونه‌های پیش تیمار شده با آنزیم‌بری به مدت ۲ دقیقه و دمای سرخ کردن ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، کمترین میزان جذب روغن را داشتند. پیش تیمار فراصوت تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۴۰ دقیقه و همچنین تلفیق این پیش تیمار با پیش تیمار آنزیم‌بری (۲ و ۴ دقیقه)، باعث افزایش در جذب روغن نمونه‌ها گردید. قابل ذکر است، تلفیق پیش تیمار فراصوت تحت

### منابع

- 1- Aguilar, C. N., Anzaldúa-Morales, R., Talamas, R., & Gastelum, G. 1997. Low-temperature blanch improves textural quality of French-fries. *Journal of Food Science*, 62: 568-571.
- 2- AOAC 1990. *Official Methods of Analysis* (15th ed). Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- 3- AOAC 1995. *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- 4- Bouchon, P., Aguilera, J. M., & Pyle, D. L. 2003. Structure oil-absorption relationships during deep-fat frying. *Journal of Food Science*, 68: 2711-2716.
- 5- Bouchon, P., & Steve, L. T. 2009. Understanding oil absorption during deep-fat frying. *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 57 (pp. 209-234): Academic Press.

- 6- Bungler, A., Moyano, P., & Rioseco, V. 2003. NaCl soaking treatment for improving the quality of French-fried potatoes. *Food Research International*, 36: 161-166.
- 7- Califano, A. N., & Calvelo, A. 1987. Adjustment of surface concentration of reducing sugars before frying of potato strips. *Journal of Food Processing and Preservation*, 12: 1-9.
- 8- Debnath, S., Rastogi, N. K., Krishna, A. G. G., & 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.
- 9- Fernandes, F. A. N., Gallao, M. I., & Rodrigues, S. 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2): 186-190.
- 10- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44(1): 39-46.
- 11- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. 2001. Deep fat frying of potato strips, Quality Issues. *Drying Technology*, 19(5): 879-935.
- 12- Lamberg, I., Hallstrom, B., & Olsson, H. 1990. Fat uptake in a potato drynig/frying process. *LWT- Food Science and Technology*, 23: 295-300.
- 13- Math, R. G., Velu, V., Nagender, A., & Rao, D. G. 2004. Effect of frying conditions on moisture, fat and density of papad. *Journal of Food Engineering*, 64: 429-434.
- 14- Mir-Bel, J., Oria, R., & Salvador, M. L. 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering*, 95(3): 416-422.
- 15- Moreira Azoubel, P., Amparo Melo Baima, M., Rocha Amorim, M., & Sorelly Belém Oliveira, S. 2011. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 97: 194-198.
- 16- Moyano, P. C., & Pedreschi, F. 2006. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT- Food Science and Technology*, 39: 285-291.
- 17- Moyano, P. C., Rioseco, V. K., & Gonzalez, P. A. 2002. Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated French fries. *Journal of Food Engineering*, 54: 249-255.
- 18- Pedreschi, F., Claudia, C., Moyano, P., & Troncoso, E. 2008. Oil distribution in potato slices during frying. *Journal of Food Engineering*, 87: 200-212.
- 19- Pedreschi, F., Trivisany, X., Reyes, C., Troncoso, E., & Pedreschi, R. 2009. Kinetics of extraction of reducing sugar during blanching of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 91: 443-447.
- 20- Rimac-Brcic, S., Lelas, V., Rade, D., & Simundic, B. 2004. Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying. *Journal of Food Engineering*, 64: 237-241.
- 21- Rubnov, M., & Saguy, I. S. 1997. Fractal analysis and crust water diffusivity of a restructured potato product during deep-fat frying. *Journal of Food Science*, 62: 135-137.
- 22- Steel, R. G. D., Torrie, J. H., & Dicky, D. A. 1997. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill.
- 23- Troncoso, E., & Pedreschi, F. 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT- Food Science and Technology*, 42: 1164-1173.
- 24- Ufheil, G., & Escher, F. 1996. Dynamics of oil uptake during deep-fat frying of potato slices. *LWT- Food Science and Technology*, 29: 640-644.

- 25- Williams, R., & Mittal, G. S. 1999. Low-fat fried foods with edible coatings: Modeling and simulation. *Journal of Food Science*, 24: 183-187.
- 26- Ziaifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Engineering*, 33(2): 191-212.

## The effect of ultrasound and blanching on oil uptake during deep-fat frying of potato

Elham Razzagh Pour<sup>1</sup>, Jalal Dehghannya<sup>2\*</sup>, Babak Ghanbarzadeh<sup>3</sup>

1-MSc. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2-Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\*Corresponding author (J\_dehghannya@tabrizu.ac.ir)

3-Associated Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

The aim of this study was to investigate the influence of ultrasound and blanching pretreatments on oil uptake and to model them on potato slices during deep-fat frying. Ultrasound pretreatments were applied at 40 kHz for 20 and 40 min and blanching pretreatments were done in hot water at 80°C for 2 and 4 min. Then, frying processes were performed at 150, 170 and 190°C for 90, 180, 270 and 360 seconds. To model the oil uptake as a function of time, four experimental proposed models and two empirical models available in the literature were used. In addition to the time, the oil uptake was modeled as a function of moisture content, density and shrinkage. Results showed that blanched samples for 2 min had the lowest oil uptake at the frying temperature of 150°C. Furthermore, the combination of ultrasound pretreatment (at 40 kHz for 20 min) and blanching (for 2 and 4 min), decreased oil uptake at the frying temperatures of 150 and 170°C. Moreover, experimental data were fitted well with empirical models. In addition, for determining the coefficients of the oil uptake models, some correlations were found by multivariate regression analysis in various conditions of the frying process.

**Keywords:** Blanching, Frying, Modeling, Oil Uptake, Ultrasound