

# تأثیر امواج فراصوت و آنزیم‌بری روی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی سرخ کردن

جلال دهقان‌نیا<sup>۱\*</sup>، الهام رزاق‌پور<sup>۲</sup>، بابک قنبرزاده<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۲۲)

## چکیده

با توجه به این که چروکیدگی در محصولات سرخ‌شده یک ویژگی منفی از نظر مصرف‌کننده محسوب می‌شود، می‌توان با استفاده از برخی پیش- تیمارهای نوین، این خصوصیت کیفی را بهبود بخشیده و باعث افزایش مقبولیت محصول گردید. هدف از این تحقیق، بررسی و مدل‌سازی چروکیدگی طی سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با امواج فراصوت و آنزیم‌بری بود. قطعات سیب‌زمینی، بعد از انجام پیش‌تیمارهای مربوطه در سه دما (۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) و چهار زمان مختلف (۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه) سرخ شدند. در این مطالعه، شش مدل تجربی برای بررسی تغییرات چروکیدگی با گذشت زمان سرخ کردن ارائه شد. طبق نتایج بدست آمده، تمام پیش‌تیمارهای اعمال شده به جز پیش‌تیمار امواج فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه، باعث کاهش چروکیدگی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد شدند. همچنین، مدل‌های به کار رفته به خوبی داده‌های آزمایشی را با داشتن  $R^2$  بالا و RMSE پایین برازش نمودند. این مدل‌ها می‌توانند در پیش‌بینی فرآیند سرخ کردن و کنترل کیفیت محصول نهایی مفید باشند.

کلید واژگان: آنزیم‌بری، امواج فراصوت، چروکیدگی، سرخ کردن عمیق، مدل‌سازی

\* مسئول مکاتبات: j\_deghannya@tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

سیب‌زمینی یک محصول نشاسته‌ای یک‌ساله و دارای برگ‌های مرکب و بریده و گل‌های سفید یا بنفش است. میوه آن کوچک، قرمز و به علت دارا بودن سولانین، سمی است ولی دارای ساقه‌های زیرزمینی خوراکی بوده که حاوی اندوخته نشاسته‌ای فراوان (۹ تا ۲۵ درصد) می‌باشد [۱].

سرخ‌کردن عمیق، یک فرآیند پیچیده و مهم در صنعت غذا است که در طول این فرآیند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حسی ماده غذایی تغییر می‌کند. کیفیت ماده غذایی سرخ‌شده عمدتاً به خصوصیات ساختاری، بافتی و ظاهری آن بستگی دارد [۲، ۳]. در این فرآیند، معمولاً از روغن‌های گیاهی تصفیه‌شده استفاده می‌شود؛ البته در موارد اندکی استفاده از روغن هیدروژنه پیشنهاد شده که کمتر مستعد اکسایش است [۴، ۵].

کیفیت ساختاری، یک ویژگی مهم در ارتباط با مقبولیت مواد غذایی سرخ‌شده می‌باشد و این ویژگی تحت تأثیر ماده خام و شرایط فرآیند قرار می‌گیرد. پوسته تشکیل شده طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، یکی از ویژگی‌های مطلوب مواد غذایی سرخ‌شده است [۶] که انتقال جرم و حرارت، جذب روغن و ویژگی‌های فیزیکی محصولات سرخ‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷]. افزایش ضخامت پوسته تشکیل شده در سیب‌زمینی تا دقیقه چهارم فرآیند سرخ‌شدن ادامه می‌یابد [۸]. همچنین، به دلیل استفاده از دماهای بالای فرآیند، محتوای رطوبت و در نتیجه ضخامت و ابعاد محصول کاهش یافته و میزان چروکیدگی ماده سرخ‌شده افزایش یافته و خصوصیات کیفی آن تغییر می‌یابد [۹]. فرآیند سرخ‌کردن می‌تواند توسط پدیده‌هایی مانند چروکیدگی یا پف کردن، ساختار متخلخل محصول را تغییر دهد [۱۰، ۱۱]. چروکیدگی بر روی خصوصیات فیزیکی ماده غذایی مانند دانسیته و تخلخل (حجم فضاهای خالی موجود در داخل مواد غذایی) تأثیر می‌گذارد. تخلخل یک شاخص مهم در پیش‌بینی خصوصیات دیفوزیونی سلول‌های ماده غذایی طی خروج رطوبت می‌باشد [۱۲]. چروکیدگی، به صورت تغییرات در ابعاد و اندازه محصول سرخ‌شده تعریف می‌شود و ابتدا در قسمت سطحی شروع می‌-

شود؛ زیرا خروج رطوبت از ماده غذایی در اثر فرآیند سرخ‌کردن، ابتدا از سطح آن رخ می‌دهد و با ادامه یافتن فرآیند به قسمت‌های درونی پیش‌روی می‌کند. در مراحل ابتدایی فرآیند سرخ‌کردن، به دلیل بالا بودن میزان خروج رطوبت از محصول، تغییرات حجمی و میزان چروکیدگی نیز بالا بوده ولی در مراحل نهایی سرخ‌کردن به دلیل کاهش میزان رطوبت و انتقال جرم و در نتیجه کاهش تغییرات حجمی، میزان چروکیدگی کم می‌شود [۱۳، ۱۴]. علاوه بر این، تشکیل پوسته سخت در مراحل پایانی فرآیند از تغییر حجم ممانعت به عمل آورده و در نتیجه چروکیدگی متوقف می‌شود [۱۲، ۱۵].

با توجه به این‌که چروکیدگی یک ویژگی منفی از دید مصرف‌کننده محسوب می‌شود، می‌توان با استفاده از برخی پیش‌تیمارها مانند امواج فراصوت و آنزیم‌بری قبل از فرآیند سرخ‌کردن خصوصیات کیفی محصول سرخ‌شده را بهبود بخشیده و باعث افزایش مقبولیت محصول می‌گردد. دغدغه‌های فراوان در مورد سلامت مصرف‌کنندگان منجر به انجام تحقیقات متعدد در ارتباط با کاهش جذب روغن در محصولات سرخ‌کردنی شده است؛ با این حال در ارتباط با تأثیر پیش‌تیمارها و متغیرهای فرآیند بر روی ویژگی‌های فیزیکی سیب‌زمینی سرخ‌شده تحقیقات کمی در دسترس می‌باشد.

استفاده از پیش‌تیمار آنزیم‌بری قبل از سرخ‌کردن می‌تواند در بهبود خصوصیات ماده غذایی سرخ‌شده مؤثر باشد. این پیش‌تیمار موجب بهبود رنگ و بافت ورقه‌های سیب‌زمینی و همچنین، کاهش جذب روغن از طریق ژلاتینه‌کردن نشاسته سطحی می‌شود [۱۶]. از طرف دیگر، در مورد تأثیر پیش‌تیمار امواج فراصوت بر فرآیند سرخ‌کردن بر اساس ساز و کار عمل امواج فراصوت، انتظار بر این است که این امواج با انقباض و انبساط‌های متوالی و با تشکیل حباب در داخل ماده غذایی باعث ایجاد یک‌سری کانال‌های میکروسکوپی درون ماده غذایی گردد [۱۷]. این عمل، منجر به تسهیل خروج رطوبت، افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش زمان سرخ‌کردن و در نتیجه آسیب کمتر به لوله‌های موئین و کاهش چروکیدگی شده و در نهایت باعث بهبود خصوصیات کیفی محصول می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

سیب‌زمینی مورد استفاده در این تحقیق از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایشات در سردخانه بالای صفر نگهداری شد. روغن مورد استفاده، روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه-دانه) بود.

### ۲-۲- تجهیزات

در این تحقیق، از یک سرخ‌کن خانگی (Moulinex، مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، دارای محفظه ضدزنگ و سبد جداشونده)، حمام امواج فراصوت (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان فرآیند) برای اعمال پیش‌تیمار امواج فراصوت و از بن‌ماری (WM22، ساخت شرکت فن-آزماگستر) برای آنزیم‌بری استفاده شد.

### ۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

سیب‌زمینی‌ها پس از شستشو و پوست‌گیری به قطعات مکعب مستطیلی با ابعاد  $1/2 \times 1/2 \times 4$  سانتی‌متر، برش داده شدند. برای برش دادن از یک برش‌دهنده دستی استفاده شد. نمونه‌ها قبل از انجام پیش‌تیمارها، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شده و سپس با کاغذ رطوبت‌گیر رطوبت اضافی آنها گرفته شد. در مرحله بعد، پیش‌تیمارهای مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شدند (جدول ۱):

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

۲ و ۳: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار امواج فراصوت، در حمام فراصوت در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز (با توان خروجی ۱۶۰ وات) و مدت زمان ۲۰ و ۴۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

در پژوهشی، ضیایی‌فر و همکاران [۱۸]، تأثیر زمان و دمای سرخ‌کردن را بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج بدست آمده در این تحقیق، با افزایش دمای سرخ‌کردن در زمان‌های یکسان، میزان چروکیدگی نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین، بیشترین میزان چروکیدگی در مراحل ابتدایی فرآیند بود و در مراحل پایانی به دلیل تشکیل پوسته سخت، چروکیدگی متوقف گردید. در مطالعه‌ای دیگر، تایو و بابک [۱۳]، تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف (آنزیم‌بری، منجمد کردن، خشک کردن و آبگیری اسمزی) را بر روی چروکیدگی و ویژگی‌های بافتی سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده مورد بررسی قرار دادند. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا سیب‌زمینی‌ها، پیش‌تیمار شده و سپس در روغن کانولای خالص در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵-۰/۵ دقیقه سرخ شدند. طبق نتایج بدست آمده، نمونه‌های شاهد نسبت به نمونه‌های پیش‌تیمار شده چروکیدگی کمتری داشتند. حداکثر تغییر در قطر نمونه‌ها، بسته به نوع پیش‌تیمار اعمال شده بین ۶/۷٪ الی ۱۰/۲٪ گزارش شد. همچنین، بیشترین مقدار تغییرات ضخامت نمونه‌ها، پس از گذشت ۱۲۰ ثانیه از شروع فرآیند مشاهده شد که بالاترین مقدار آن ۱۸/۳٪ و مربوط به نمونه منجمد شده بود.

به منظور بهینه‌سازی فرآیند سرخ‌کردن و افزایش کیفیت محصول، درک بهتر روند پدیده چروکیدگی و تلاش برای کاهش آن ضروری است و این مهم از طریق مدل‌سازی ریاضی چروکیدگی قابل دستیابی می‌باشد. مدل‌سازی چروکیدگی، روابط بین میزان چروکیدگی و متغیرهای مختلف مثل زمان و دمای فرآیند را نشان می‌دهد. با استفاده از این مدل‌ها، می‌توان ترکیبی از مناسب‌ترین زمان و دما را برای تولید محصولی با کمترین میزان چروکیدگی بدست آورد.

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پیش‌تیمارهای آنزیم‌بری و امواج فراصوت روی میزان چروکیدگی و همچنین، مدل‌سازی چروکیدگی در طول سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با امواج فراصوت و آنزیم‌بری است.

در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز (با توان خروجی ۱۶۰ وات) و مدت زمان ۲۰ و ۴۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند و سپس در بین ماری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ و ۴ دقیقه به طور مجزا آنزیم‌بری شدند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار آنزیم‌بری، در بین ماری 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 پیش-تیمارهای امواج فراصوت و آنزیم‌بری، ابتدا در حمام فراصوت

Table 1 Different treatments and their abbreviations

Number	Pretreatment	Symbol
1	Control	Control
2	Ultrasound with frequency of 40 kHz for 20 minutes	U20
3	Ultrasound with frequency of 40 kHz for 40 minutes	U40
4	Blanching for 2 minutes	B2
5	Blanching for 4 minutes	B4
6	Ultrasound with frequency of 40 kHz for 20 minutes - Blanching for 2 minutes	U20 - B2
7	Ultrasound with frequency of 40 kHz for 20 minutes - Blanching for 4 minutes	U20 - B4
8	Ultrasound with frequency of 40 kHz for 40 minutes - Blanching for 2 minutes	U40 - B2
9	Ultrasound with frequency of 40 kHz for 40 minutes - Blanching for 4 minutes	U40 - B4

## ۲-۴- شرایط سرخ کردن

سرخ کردن سیب‌زمینی‌ها در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه انجام شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (مطابق جدول ۱)، دستگاه سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شده و دما و زمان سرخ‌کن تنظیم شد، با رسیدن دمای روغن به دمای موردنظر، ۱۲۰-۱۰۰ گرم نمونه در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شد. پس از رسیدن به زمان موردنظر، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شدند. سپس، روغن سطحی نمونه‌ها با کاغذ جاذب گرفته شده و جهت انجام آزمایش‌های مربوطه آماده گردیدند. تمام آزمایش‌ها در دو تکرار انجام شدند.

## ۲-۵- آزمایش‌ها

### ۲-۵-۱- محتوای رطوبت

محتوای رطوبت، با خشک‌کردن نمونه‌ها در آون با جریان جابجایی در دمای  $105 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری شد [۱۹] و بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک گزارش گردید.

## ۲-۵-۲- میزان چروکیدگی

برای بدست آوردن چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری اولیه نمونه‌ها قبل از سرخ‌کردن ( $V_0$ ) و حجم ظاهری ثانویه ( $V_t$ ) بعد از سرخ‌کردن، با استفاده از تولوئن و توسط پیکنومتر طبق رابطه ۱ تعیین شدند:

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho} \quad (1)$$

در این رابطه،  $V$ : حجم ظاهری ( $\text{cm}^3$ )،  $M$ : وزن نمونه (g)،  $M_1$ : وزن پیکنومتر خالی و حلال (g)،  $M_2$ : وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (g) و  $\rho$ : دانسیته تولوئن ( $\text{kg/m}^3$ ) می‌باشد. سپس با استفاده از رابطه ۲، میزان چروکیدگی تعیین شد [۱۸]:

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

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

## ۲-۵-۳- دانسیته ظاهری

بعد از محاسبه حجم ظاهری نمونه‌ها، از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ‌شده، مقادیر دانسیته ظاهری به صورت گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد [۱۸].

## ۲-۵-۴- محتوای روغن

میزان روغن نمونه‌های سرخ‌شده، به وسیله استخراج روغن نمونه‌ها در دستگاه سوکسله با حلال پترولیوم‌تر اندازه‌گیری شد [۲۰] و نتایج بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک گزارش گردید.

## ۲-۶- مدل‌سازی ریاضی

در این تحقیق، مدل‌سازی تجربی برای پیش‌بینی روند تغییرات چروکیدگی با گذشت زمان صورت گرفت. مدل‌های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار MATLAB (Version 7.12.0.635 R2011a) بدست آمدند. علاوه بر مدل‌های فوق، مدل‌سازی چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق به صورت تابعی از محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و دانسیته ظاهری نیز انجام شد. 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 امواج فراصوت و زمان آنزیم‌بری) مدل‌سازی شدند.

## ۲-۷- تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق، آزمایش فاکتوریل بر مبنای طرح کامل تصادفی توسط نرم‌افزار SAS 9.1 صورت گرفت. تیمارهای 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 سرخ شدند ( $2 \times 4 \times 3 = 24$ ) و تأثیر هر کدام از پیش‌تیمارها روی چروکیدگی آنالیز شد. مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون بونفرونی<sup>۱</sup> در سطح احتمال ۵٪ [۲۱] انجام شد.

## ۳- نتایج و بحث

در تمامی دماها، با افزایش زمان سرخ‌کردن در نمونه‌های شاهد سرخ‌شده، میزان چروکیدگی افزایش یافت (شکل ۱- a). در مراحل ابتدایی فرآیند به دلیل بالا بودن میزان خروج رطوبت از محصول، تغییرات حجمی و میزان چروکیدگی بالا بود؛ ولی با گذشت زمان به دلیل کاهش میزان رطوبت و انتقال جرم و همچنین تشکیل پوسته، میزان افزایش در چروکیدگی کاهش پیدا کرد و به حالت خطی نزدیک شد. این نتایج با یافته‌های تایو و بایک [۱۳] و گاریو و موریرا [۱۴] مطابقت دارد. همچنین، دماهای بالای سرخ‌کردن، باعث افزایش معنی‌دار چروکیدگی در زمان‌های یکسان گردید؛ زیرا در دماهای بالا، میزان از دست‌دادن رطوبت بیشتر بود [۱۸، ۲۲]. شکل ۱- b، تغییرات چروکیدگی نمونه‌های شاهد سرخ‌شده در دماهای مختلف در مقابل محتوای رطوبت را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با کاهش محتوای رطوبت نمونه‌ها، میزان چروکیدگی بیشتر شد.

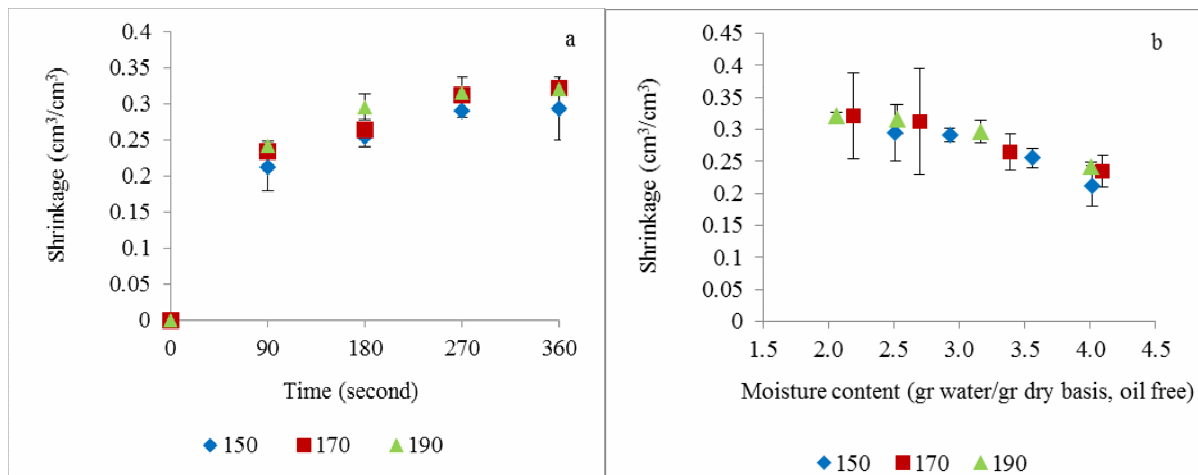
شکل ۲- a، منحنی تغییرات چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی در تیمار شاهد و نمونه‌های پیش‌تیمار شده با امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ و ۴۰ دقیقه و آنزیم‌بری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ و ۴ دقیقه به صورت مجزا و سپس سرخ‌شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش زمان سرخ‌کردن، میزان باعث ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار ماده غذایی شده و این امر موجب افزایش سرعت خروج رطوبت، آسیب کمتر به لوله‌های موئین و در نتیجه کاهش چروکیدگی نمونه‌ها گردید. در طرف دیگر، اعمال امواج فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه، احتمالاً به دلیل فروپاشی ساختار ماده غذایی، باعث افزایش میزان چروکیدگی شد؛ هر چند این افزایش نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. همچنین، خروج سریع‌تر رطوبت و تشکیل زودتر پوسته می‌تواند دلیل دیگری برای توجیه کاهش چروکیدگی در استفاده از پیش‌تیمار امواج

1. Bonferroni

ولی بین میزان چروکیدگی نمونه شاهد و نمونه‌های پیش‌ تیمار شده، اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری وجود نداشت. شکل ۲- (c, d) و شکل ۲- (e, f)، به ترتیب، تغییرات چروکیدگی نمونه‌های پیش‌ تیمار شده به صورت مجزا و تلفیقی و سپس سرخ شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی-گراد را نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده، روند داده‌های آزمایشی در هر دو دما در نمونه‌های شاهد و پیش‌ تیمار شده، مشابه داده‌های آزمایشی بدست آمده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود.

فراصوت (به مدت ۲۰ دقیقه) و آنزیم‌بری در فرآیند سرخ کردن باشد.

شکل ۲- b، منحنی تغییرات چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی را در زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در نمونه‌های پیش- تیمار شده با امواج فراصوت (به مدت ۲۰ و ۴۰ دقیقه) و آنزیم‌بری (به مدت ۲ و ۴ دقیقه) به صورت تلفیقی نشان می-دهد. طبق نتایج بدست آمده، تمامی پیش‌ تیمارهای تلفیقی باعث کاهش چروکیدگی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شدند



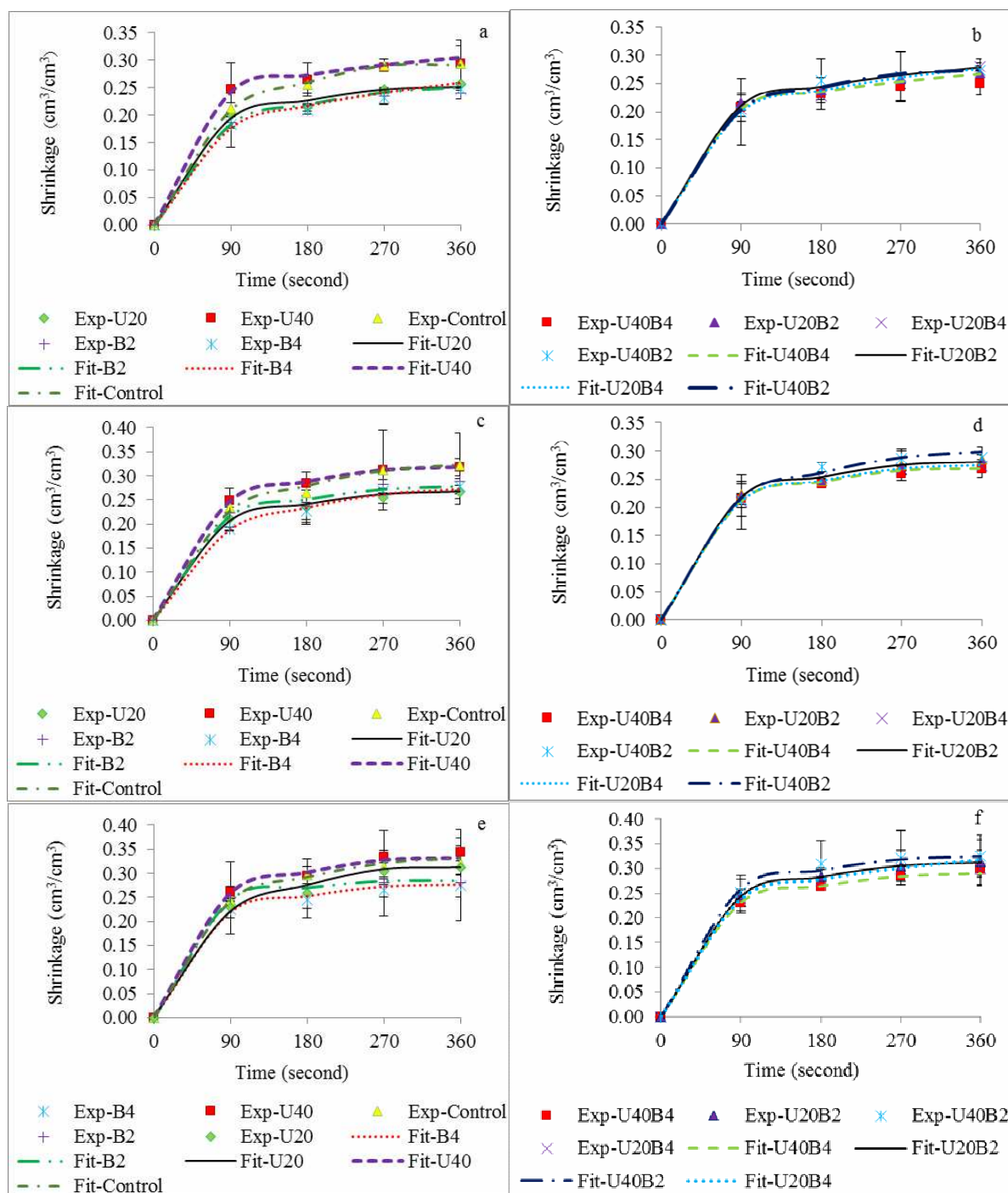
**Fig 1** Shrinkage of potato slices (Control) as a function of frying time (a) and moisture content (b) at 150, 170 and 190°C

شاخص‌های آماری مناسب با میزان  $R^2$  بالا و RMSE پایین برازش نمودند (جدول ۳). مدل‌سازی چروکیدگی طی فرآیند سرخ کردن عمیق به صورت تابعی از محتوای روغن (O)، محتوای رطوبت بدون بعد ( $M_t$ ) و دانسیته ظاهری ( $\rho$ ) نیز با استفاده از چند مدل پیشنهادی با  $R^2$  بالا صورت گرفت (جدول ۴). همچنین، ضرایب مدل‌های جدول ۲ با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چندمتغیره به صورت تابعی از شرایط فرایند (دما، زمان امواج فراصوت و زمان آنزیم‌بری) مدل‌سازی شدند (جدول ۵). با استفاده از این مدل‌ها می‌توان بدون انجام آزمایشات پرهزینه و زمان‌بر در همه دماها، زمان‌ها و شرایط مختلف فرآیند، چروکیدگی محصول را بدست آورده و مناسب‌ترین شرایط را برای انجام فرآیند بدست آورد.

چروکیدگی در تمامی پیش‌ تیمارها افزایش پیدا کرد و در زمان‌های یکسان سرخ کردن، پیش‌ تیمار آنزیم‌بری به مدت ۴ دقیقه کمترین میزان چروکیدگی را داشت. این پیش‌ تیمار، موجب افزایش نفوذپذیری بافت و تسریع در خروج بخار آب از ماده غذایی و در نتیجه کاهش چروکیدگی نمونه‌ها در طول فرآیند می‌شود [۲۳، ۲۴]. اعمال امواج فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه نیز

### ۳-۱- مدل‌سازی چروکیدگی

جدول ۲، مدل‌سازی چروکیدگی از طریق برازش داده‌های آزمایشی را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۲، منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی چروکیدگی نمونه‌های مختلف (بر اساس جدول ۱) را با مدل ۵ (جدول ۲) در سه دما و چهار زمان مختلف نشان می‌دهد. مدل ۵ به همراه سایر مدل‌های پیشنهادی دیگر به خوبی داده‌های آزمایشی را با داشتن



**Fig 2** Shrinkage variations of potato slices based on experimental (Exp) and predicted (Fit) data (model 5, Table 2) for various treatments based on Table 1 at 150°C (a,b), 170°C (c,d) and 190°C (e,f)

**Table 2** Shrinkage (S) modeling of potato slices during frying process as a function of time (t)\*

Number	Model	Reference
1	$S = a(1 - \exp(-bt))$	Proposed in this study
2	$S = (1 + t)/(at + b)$	Proposed in this study
3	$S = abt/(1 + bt)$	Proposed in this study
4	$S = (1 - \exp(-at))/(1 - bt)$	Proposed in this study
5	$S = \exp(-at^b)$	Proposed in this study
6	$S = a/(1 + t^b)$	Proposed in this study

\* a, b: Model constants

**Table 3** Statistical parameters obtained from models 1-6 in Table 2 for different treatments and temperatures during frying

<b>Model 1</b>						
<b>T (°C)</b>						
<b>150</b>		<b>170</b>		<b>190</b>		
<b>Treatment</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>
Control	0.98	0.0175	0.98	0.0170	0.98	0.0166
U20	0.98	0.0168	0.99	0.0135	0.99	0.0139
U40	0.99	0.0126	0.98	0.0202	0.99	0.0119
B2	0.99	0.0137	0.98	0.0177	0.99	0.0115
B4	0.98	0.0177	0.99	0.0110	0.98	0.0227
U20 – B2	0.98	0.0165	0.99	0.0146	0.99	0.0099
U20 – B4	0.98	0.0147	0.99	0.0069	1	0.0008
U40 – B2	0.99	0.0066	0.99	0.0056	0.99	0.0113
U40 – B4	0.98	0.014	0.98	0.0148	0.99	0.0092

<b>Model 2</b>						
<b>T (°C)</b>						
<b>150</b>		<b>170</b>		<b>190</b>		
<b>Treatment</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>
Control	0.98	0.0131	0.99	0.0126	0.99	0.0124
U20	0.99	0.0128	0.99	0.0086	0.99	0.0094
U40	0.99	0.0075	0.99	0.0146	0.99	0.0075
B2	0.99	0.0096	0.98	0.0138	0.99	0.0098
B4	0.98	0.0132	0.99	0.0073	0.98	0.0170
U20 – B2	0.99	0.0122	0.99	0.0100	0.99	0.0061
U20 – B4	0.99	0.0102	0.99	0.0042	0.99	0.0084
U40 – B2	0.99	0.0067	0.99	0.0048	0.99	0.0070
U40 – B4	0.99	0.0104	0.99	0.0106	0.99	0.0060

<b>Model 3</b>						
<b>T (°C)</b>						
<b>150</b>		<b>170</b>		<b>190</b>		
<b>Treatment</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>
Control	0.98	0.0127	0.99	0.0121	0.99	0.0116
U20	0.99	0.0117	0.99	0.0074	0.99	0.0082
U40	0.99	0.0070	0.99	0.0143	0.99	0.0065
B2	0.99	0.0092	0.99	0.0133	0.99	0.0073
B4	0.98	0.0130	0.99	0.0069	0.98	0.0169
U20 – B2	0.99	0.0116	0.99	0.0092	0.99	0.0041
U20 – B4	0.99	0.0098	0.99	0.0019	0.99	0.0067
U40 – B2	0.99	0.0058	0.99	0.0035	0.99	0.0055
U40 – B4	0.99	0.0096	0.99	0.0099	0.99	0.0039

<b>Model 4</b>						
<b>T (°C)</b>						
<b>150</b>		<b>170</b>		<b>190</b>		
<b>Treatment</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>
Control	0.97	0.0216	0.97	0.0220	0.97	0.0229
U20	0.97	0.0252	0.98	0.0203	0.98	0.0204
U40	0.98	0.0159	0.97	0.0239	0.98	0.0177
B2	0.98	0.0172	0.97	0.0220	0.97	0.0217
B4	0.97	0.0202	0.99	0.0130	0.97	0.0261
U20 – B2	0.97	0.0221	0.97	0.0202	0.98	0.0172
U20 – B4	0.97	0.0185	0.99	0.0122	0.99	0.0081
U40 – B2	0.99	0.0105	0.99	0.0102	0.98	0.0180
U40 – B4	0.97	0.0196	0.97	0.0204	0.98	0.0160



Model 5		T (°C)					
		150		170		190	
Treatment	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	
Control	0.99	0.0092	0.99	0.0085	0.99	0.0081	
U20	0.99	0.0081	0.99	0.0031	0.99	0.0055	
U40	0.99	0.0030	0.99	0.0101	0.99	0.0045	
B2	0.99	0.0061	0.99	0.0108	0.99	0.0046	
B4	0.99	0.0094	0.99	0.0051	0.99	0.0124	
U20 – B2	0.99	0.0080	0.99	0.0054	1	0.0008	
U20 – B4	0.99	0.0063	0.99	0.0026	0.99	0.0109	
U40 – B2	0.99	0.0079	0.99	0.0063	0.99	0.0015	
U40 – B4	0.99	0.0066	0.99	0.0065	0.99	0.0010	

Model 6		T (°C)					
		150		170		190	
Treatment	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	
Control	0.96	0.0235	0.96	0.0245	0.97	0.0221	
U20	0.98	0.0202	0.97	0.0269	0.96	0.0287	
U40	0.94	0.0356	0.94	0.0183	0.95	0.0236	
B2	0.95	0.0254	0.96	0.0252	0.99	0.0134	
B4	0.94	0.0221	0.94	0.0234	0.93	0.0311	
U20 – B2	0.97	0.0231	0.97	0.0235	0.97	0.0245	
U20 – B4	0.96	0.0262	0.97	0.0238	0.97	0.0256	
U40 – B2	0.96	0.0269	0.95	0.0319	0.97	0.0253	
U40 – B4	0.97	0.0203	0.97	0.0230	0.98	0.0205	

**Table 4** Shrinkage modeling of potato slices during frying process as a function of oil content (O), dimensionless moisture ratio ( $M_t$ ) and apparent density ( $\rho$ )

Number	Model	R <sup>2</sup>	Reference
1	$S = a.O + b$	0.97	Proposed in this study
2	$S = a.M_t^b + c$	0.98	Proposed in this study
3	$S = a.\rho^b + c$	0.98	Proposed in this study

U: Ultrasound time, B: Blanching time, T: Frying temperature

### ۲-۳- معبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی

به منظور معبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی، نتایج حاصل از برازش مقادیر چروکیدگی آزمایشی با زمان فراصوت ۳۰ دقیقه، آنزیم‌بری ۳ دقیقه و دمای سرخ کردن ۱۷۰ درجه سانتی-گراد با مقادیر چروکیدگی پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی ۵ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست، بین چروکیدگی مدل ۵ و تیمار آزمایشی، انطباق خوبی ( $R^2=0.994$ ) وجود دارد. بنابراین، مدل توسعه یافته پیشنهادی برای پیش‌بینی سینتیک سرخ کردن نمونه‌ها می‌تواند مناسب در نظر گرفته شود.

**Table 5** Multivariate models for constants of models 1-6 in Table 2 according to process conditions

R <sup>2</sup>	$S = a(1 - \exp(-bt))$
0.9954	$a = 0.00064U - 0.00386B + 0.001671T$
0.9758	$b = -5E-06U - 5.2E-05B + 8.92E-05T$
R <sup>2</sup>	$S = (1 + t)/(at + b)$
0.9746	$a = -0.00295U + 0.073222B + 0.016879T$
0.9351	$b = -0.07372U + 6.597809B + 0.827748T$
R <sup>2</sup>	$S = abt/(1 + bt)$
0.9932	$a = 0.00078U - 0.00405B + 0.001917T$
0.9396	$b = -3.5E-05U - 0.00017B + 0.000132T$
R <sup>2</sup>	$S = (1 - \exp(-at))/(1 - bt)$
0.9923	$a = 6.51E-06U - 5.1E-05B + 2.18E-05T$
0.9734	$b = 2.69E-06U - 9.5E-05B - 2.5E-05T$
R <sup>2</sup>	$S = \exp(-at^b)$
0.9618	$a = 0.003078U + 0.055668B + 0.017606T$
0.9637	$b = -0.00042U + 0.000139B - 0.00091T$
R <sup>2</sup>	$S = a/(1 + t^b)$
0.9965	$a = 0.000687U - 0.00526B + 0.001956T$
0.9915	$b = -0.00022U - 0.00225B - 0.00139T$

- [3] Pinthus, E. J., Weinberg, P., & Saguy, I. S. (1995). Deep fat fried potato oil uptake as affected by crust physical properties. *Journal of Food Science*, 60(4), 770-772.
- [4] Melton, S. L., Trigiano, M. K., Penfield, M. P., & Yang, R. (1993). Potato chips fried in canola and/or cottonseed oil maintain high quality. *Journal of Food Science*, 58, 1079-1083.
- [5] Hawrysh, Z. J., Erin, M. K., Kim, S. S., & Hardin, R. T. (1995). Sensory and chemical stability of tortilla chips fried in canola oil, corn oil and partially hydrogenated soybean oil. *Journal of American Oil Chemistry Society*, 72, 1123-1130.
- [6] Keller, C., Escher, F., & Solms, J. A. (1986). Method for localizing fat distribution in deep fat fried potato products. *LWT*, 19(N4), 346-348.
- [7] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. (2000). Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering*, 43, 147-154.
- [8] Du Pont, M. S., Kirby, A. B., & Smith, A. C. (1992). Instrumental and sensory tests of cooked frozen french fries. *International Journal of Food Science and Technology*, 27, 285-295.
- [9] Bouchon, P., & Aguilera, J. M. (2001). Microstructural analysis of frynig of potatoes. *Journal of Food Science and Technology*, 36, 669-676.
- [10] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (2001). Effect of pre-treatment on viscoelastic behaviour of potato strips. *Journal of Food Engineering*, 50, 11-17.
- [11] Yamsaengsung, R., & Moreira, R. G. (2002a). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying. Part I: Model development. *Journal of Food Engineering*, 53, 1-10.
- [12] Wang, N., & Brennan, J. G. (1995). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, 61-76.
- [13] Taiwo, K. A., & Baik, O. D. (2007). Effect of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *LWT*, 40, 661-668.
- [14] Garayo, J., & Moreira, R. G. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55, 181-191.

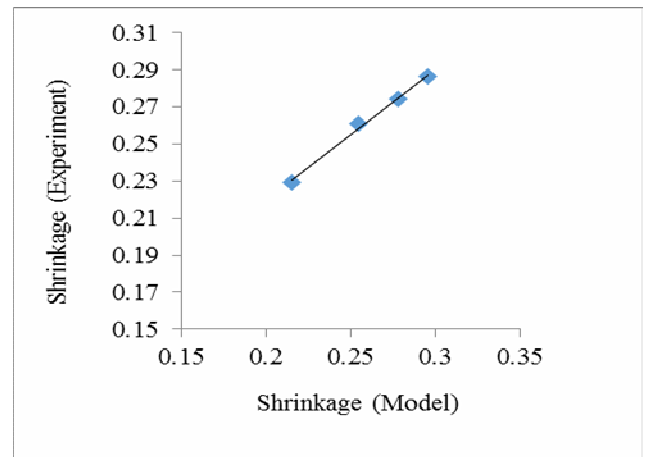


Fig 3 Linear fit between experimental and predicted shrinkage data (model 5, Table 2)

#### ۴- نتیجه‌گیری

با افزایش دما از ۱۵۰ به ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، چروکیدگی نمونه‌ها افزایش یافت و با گذشت زمان، چروکیدگی در تمامی دماها به صورت نمایی افزایش پیدا کرد و در مراحل انتهایی، از نرخ افزایش چروکیدگی کاسته شد. همچنین، تمامی پیش‌تیمارهای اعمال شده به جز پیش‌تیمار امواج فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه، باعث کاهش چروکیدگی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شدند. در این مطالعه، شش مدل تجربی برای بررسی تغییرات چروکیدگی با گذشت زمان سرخ‌کردن و به صورت تابعی از شرایط فرایند (دمای سرخ‌کردن، زمان امواج فراصوت و زمان آنزیم‌بری) ارائه شد. با استفاده از این مدل‌ها به راحتی می‌توان میزان چروکیدگی را در زمان‌های دلخواه تعیین کرده و با کمترین هزینه به محصولی با کیفیت مطلوب دست یافت.

#### ۵- منابع

- [1] FAOSTAT. (2011). Potato production data database. In: [www.fao.org](http://www.fao.org), Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [2] Moreira, R. G., Palau, J., Sweat, V. E., & Sun, X. (1995). Thermal and physical properties of tortilla chips as a function of frying time. *Journal of Food Processing and Preservation*, 19, 175-189.

- [20] AOAC. (1995). Official Methods of Analysis. *Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.*
- [21] Steel, R. G. D., Torrie, J. H., & Dicky, D. A. (1997). *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach.* New York McGraw-Hill.
- [22] Baik, O. D., & Mittal, G. S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep fat tofu frying. *Food Research International*, 38, 183-191.
- [23] Sabalani, S. S., & Rahman, M. (2002). Pore formation in food as a function of freeze drying temperature. In *Proceeding of 13th International Drying Symposium.*
- [24] Severini, C., Baiano, A., De Pilli, T., Carbone, B. F., & Derossi, A. (2005). Combined treatments of blanching and dehydration: study on potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 68(3), 289-296.
- [15] Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwi fruits during hot air and micro wave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177-182.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Ziaifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*, 33(2), 191-212.
- [19] AOAC. (1990). Official Methods of Analysis (15th ed). *Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.*

## Effect of ultrasound and blanching on shrinkage of potato slices during frying

Dehghannya, J. <sup>1\*</sup>, RazzaghPour, E. <sup>2</sup>, Ghanbarzadeh, B. <sup>3</sup>

1. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
2. M. Sc. Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
3. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(Received: 2016/10/06 Accepted:2016/11/12)

Given that shrinkage in fried products is seen as a negative feature from consumer's point of view, some of the new pretreatments can be used to improve this quality characteristic and increase the popularity of the product. The purpose of the study was to investigate and model shrinkage during frying of potato slices pretreated with ultrasound and blanching. Potato slices, after the respective pretreatments were fried at three different temperatures (150, 170 and 190°C) and four various times (90, 180, 270 and 360 s). In this study, six experimental models were presented to study shrinkage changes as a function of frying time. According to the results, all the pretreatments except the ultrasonic pretreatment for 40 minutes, reduced shrinkage of the samples compared with controls. Also, the applied models were well fitted to the experimental data with high  $R^2$  and low RMSE. These models can be useful in predicting the frying process and controlling final product quality.

**Keywords:** Blanching, Ultrasound, Shrinkage, Deep-fat frying, Modeling

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: j\_dehghannya@tabrizu.ac.ir