

تأثیر امواج فراصوت و پوشش خوراکی روی چروکیدگی قطعات سیب زمینی طی سرخ کردن

طاووس رونقی^۱، جلال دهقان‌نیا^{۲*}، بابک قنبرزاده^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲. دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

(تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۹)

چکیده

آگاهی از روابط بین متغیرهای مختلف، طی فرایند سرخ کردن عمیق محصولات غذایی از طریق مدل‌سازی می‌تواند راه مناسبی برای کنترل بهینه شرایط فرایند و در نتیجه افزایش کیفیت محصول سرخ‌شده باشد. هدف از این پژوهش، بررسی و مدل‌سازی چروکیدگی طی سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ درصد کربوکسی‌متیل سلولز و امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه بود. قطعات سیب‌زمینی با اندازه‌های $1/2 \times 1/2 \times 4$ سانتی‌متر برش داده شدند و بعد از انجام پیش‌تیمارهای مربوطه، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه سرخ شدند. پیش‌تیمار پوشش خوراکی در هر دو غلظت و همچنین امواج فراصوت، میزان چروکیدگی را نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری از لحاظ آماری کاهش دادند. به دلیل فقدان مدل‌های تجربی مناسب در منابع جهت مدل‌سازی چروکیدگی، در این مطالعه از تعدادی مدل تجربی پیشنهادی برای مدل‌سازی این پارامتر استفاده گردید. میانگین ضریب همبستگی بین نتایج آزمایشی با نتایج حاصل از این مدل‌ها ۰/۹۸ بود. واژه‌های کلیدی: انتقال جرم، سرخ کردن، خروج رطوبت، مدل‌سازی، چروکیدگی.

1- مقدمه

سپس به نواحی درونی پیش‌روی می‌کند. گارایو و موریرا [11]، تایوو و بیک [12] گزارش کردند که چروکیدگی حجمی در فرایند سرخ کردن در مراحل ابتدایی فرایند، تقریباً معادل با مقدار رطوبت خارج شده می‌باشد و در مراحل نهایی کاهش می‌یابد. پنجاه درصد میزان چروکیدگی در حدود یک سوم اول از کل زمان سرخ کردن اتفاق می‌افتد [13]. چروکیدگی، به‌طور آشکار، چگالی و تخلخل محصول را طی فرایند تحت تأثیر قرار داده و از این طریق روی انتقال جرم و حرارت و متغیرهای وابسته به آن مانند ضریب انتشار مؤثر رطوبت اثر گذاشته و یک عامل محدودکننده در برابر پدیده انتقال جرم به حساب می‌آید [14] و از این طریق، سرعت فرایند و در نهایت کیفیت محصول نهایی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، وقوع چروکیدگی در فرایندهای انتقال جرم تأثیر نامطلوبی روی شکل ظاهری ماده غذایی که یکی از رایج‌ترین ابزارهای ارزیابی کیفی مواد غذایی می‌باشد، خواهد داشت. شرایط فرایند از جمله دما و زمان فرایند، میزان رطوبت، اندازه و شکل ظاهری ماده غذایی و میزان جذب روغن، تأثیر به‌سزایی در کمیت این پارامتر دارد. از این‌رو، اندازه‌گیری چروکیدگی در شرایط متفاوت فرایند و بهینه‌کردن شرایط مورد نظر جهت کاهش آن و افزایش کیفیت محصول، اهمیت ویژه‌ای دارد [6]. به‌عنوان مثال، میزان چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی با افزایش دمای سرخ کردن در زمان‌های یکسان از فرایند، افزایش پیدا می‌کند [15].

به‌منظور کاهش میزان چروکیدگی می‌توان از راه‌کارها و فرایندهای مکمل متعدد استفاده کرد و سپس تأثیر آن‌ها را روی این فاکتور بررسی نمود. یکی از این راه‌کارها استفاده از پوشش‌های خوراکی به‌عنوان پیش‌تیمار می‌باشد که تاکنون در فرایندهای غذایی به وفور برای اهداف مختلف استفاده شده است. پوشش‌های پلی‌ساکاریدی که کربوکسی‌متیل سلولز نیز از این گروه می‌باشد، به شدت، آب‌دوست بوده و در مراحل اولیه سرخ کردن، در اثر ژلاتینه شدن در دماهای بالای 60 درجه سانتی‌گراد، یک لایه محافظ روی نمونه غذایی تشکیل می‌دهند [16]. این لایه محافظ به‌دلیل کاهش دمای مرکزی نمونه و ضریب انتقال حرارت، منجر به کاهش خروج رطوبت [17] و به دنبال آن کاهش چروکیدگی می‌شود.

سرخ کردن عمیق به‌عنوان یک فرایند پخت و خشک کردن تعریف می‌شود که در آن ماده غذایی در تماس با روغن خوراکی داغ، به‌عنوان واسط انتقال حرارت، در دمایی بالاتر از نقطه جوش آب (190-150 درجه سانتی‌گراد) قرار می‌گیرد [1]. در اثر انتقال حرارت، بخش بزرگی از آب موجود در ماده غذایی به شکل بخار خارج شده و روغن وارد ماده غذایی می‌شود [2]. به دنبال خروج رطوبت و در اثر اعمال دماهای بالا، تغییرات فیزیکی و شیمیایی بسیاری مانند مهاجرت مواد محلول، دناتوراسیون پروتئین، ژلاتینه شدن نشاسته و هم‌چنین تغییر شکل مکانیکی مانند چروکیدگی، انبساط، تشکیل پرز و پوسته و واکنش‌های شیمیایی مؤثر بر رنگ مانند واکنش مایلارد به وقوع می‌پیوندد [3]. امروزه سیب‌زمینی سرخ‌شده، بخش بزرگی از صنعت غذاهای سرخ‌شده را به خود اختصاص داده است؛ به‌طوری‌که فرایند سرخ کردن به‌دلیل ایجاد ویژگی‌های حسی مطلوب از لحاظ رنگ، بافت، عطر و طعم در ماده غذایی، یکی از بهترین روش‌های فراوری سیب‌زمینی به صورت سنتی و صنعتی می‌باشد [4]. به‌عنوان مثال در آمریکا، حدود 44٪ از کل سیب‌زمینی تولیدشده با این روش فراوری می‌شود [5]. تغییر در میزان رطوبت طی آب‌گیری مواد غذایی دارای محتوای رطوبت اولیه بالا، منجر به تغییر در شکل، تخلخل و چگالی می‌شود که این تغییرات، به‌همراه تغییرات ایجادشده در بافت و رنگ، کیفیت و ویژگی‌های محصول نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [6]. پژوهش‌گران گزارش کرده‌اند که بین میزان چروکیدگی و محتوای رطوبت ارتباط تنگاتنگی وجود دارد [7-8]. میوه‌ها و سبزی‌ها، مانند سیب‌زمینی، محتوای رطوبت اولیه بالایی دارند و به‌دلیل فشار واردشده توسط مایع داخل سلولی روی دیواره سلولی، یک ویژگی به نام تورم سلولی از خود نشان می‌دهند. زمانی که رطوبت از ماده غذایی گرفته می‌شود، باعث کاهش فشار مذکور بر دیواره سلولی شده و این عدم تعادل فشار بین داخل و خارج ماده غذایی، تنش‌های انقباضی ایجاد می‌کند که در نهایت منجر به چروکیدگی یا فروپاشی و تغییر شکل ماده غذایی می‌گردد [9]. چروکیدگی به صورت کاهش در ابعاد و اندازه ماده غذایی تعریف می‌شود [10] که ابتدا در قسمت سطحی اتفاق افتاده و

هم‌چنین، از پیش‌تیمار امواج فراصوت به صورت هم‌زمان با پوشش‌های خوراکی برای کاهش چروکیدگی طی سرخ کردن استفاده به عمل نیامده است، این پژوهش، با هدف مطالعه تأثیر کربوکسی‌متیل سلولز و تلفیق آن با امواج فراصوت روی میزان چروکیدگی و مدل‌سازی تجربی آن بر حسب تابعی از زمان، محتوای رطوبت، میزان جذب روغن و چگالی ظاهری صورت گرفت.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد

مواد خام مورد استفاده در این پژوهش، سیبزمینی و روغن مایع بود. سیبزمینی (رقم آگرا با میانگین کم‌ترین قطر 4-6 سانتی‌متر و رطوبت متوسط اولیه 82/7٪) از بازار محلی خریداری و در سردخانه بالای صفر (با دمای 12 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 85٪) به مدت 30 روز طی انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند. روغن مورد استفاده، روغن مایع مخصوص سرخ کردن (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه با نام تجاری بهار) بود. هم‌چنین، برای پوشش دادن نمونه‌ها از کربوکسی‌متیل سلولز (سانروز ساخت ژاپن) استفاده شد.

2-2- تجهیزات

در این پژوهش، از یک سرخ‌کن خانگی (Mulinex، مدل F430.R با ظرفیت 2/2 لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده 150 تا 190 درجه سانتی‌گراد و دارای سنسور دمایی (ترموستات) توکار¹ برای کنترل ترمواستاتیکی دما با دقت $\pm 3^\circ\text{C}$ ، دارای محفظه ضد زنگ و سبد جداشونده)، آون کنوکسیون (مدل BM120، 120 لیتری، ساخت ایران، شرکت فن آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) جهت اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌ها و حمام امواج فراصوت (مدل USD-4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان فرایند) استفاده شد.

2-3- آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از شستشو و پوست‌گیری سیبزمینی، برای تهیه نمونه‌ها با ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 4$ سانتی‌متر از یک کاتر دستی استفاده شد. سپس، نمونه‌ها با آب مقطر جهت حذف نشاسته سطحی

1. Built-in temperature sensor

علاوه بر پیش‌تیمار مذکور، طی دهه‌های اخیر استفاده از امواج فراصوت¹ در فرایندهای صنایع غذایی با هدف بهینه‌سازی فرایند و بهبود کیفیت ماده غذایی مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، از امواج فراصوت برای پیش‌تیمار میوه‌ها قبل از فرایند خشک کردن جهت کاهش زمان فرایند و افزایش کیفیت محصول مورد فراوری به‌طور گسترده استفاده شده است [18]. امواج فراصوت، با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی‌درپی در ماده غذایی باعث تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و سهولت خروج رطوبت از داخل محصول از طریق کانال‌های ایجادشده در طی فرایند خشک شدن می‌شود [19]. بنابراین، امواج فراصوت به دلیل افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، افزایش سرعت انتشار مولکول‌های آب حین آب‌گیری و آسیب کم‌تر به لوله‌های مویین باعث کاهش چروکیدگی و بهبود ویژگی‌های رنگی و حسی محصول می‌شود [19]. انتظار می‌رود با توجه به شباهت فرایند سرخ کردن با خشک کردن از نقطه‌نظر انتقال جرم [20]، استفاده از امواج فراصوت در فرایند سرخ کردن، نتایج مشابه با خشک کردن در پی داشته باشد.

به‌منظور دستیابی به محصولات نهایی سرخ‌شده با کیفیت مورد نظر، فهم برهمکنش‌های پیچیده و ساختاری زیادی که طی این فرایند اتفاق افتاده و ویژگی‌های محصول نهایی را تعیین می‌کند، از اهمیت خاصی برخوردار است. برای بهینه‌سازی فرایند سرخ کردن برای کاربردهای صنعتی، درک بهتر روند پدیده چروکیدگی و دستیابی به توانایی لازم در جهت کنترل یا کاهش آن، مدل‌سازی ریاضی چروکیدگی ضروری است. مدل‌سازی چروکیدگی، روابط بین متغیرهای وابسته به میزان چروکیدگی و زمان را نشان می‌دهد. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی میزان تغییر حجم طی فرایند سرخ کردن می‌باشند. با استفاده از این مدل‌ها، ترکیبی از مناسب‌ترین زمان و دما برای دستیابی به محصول مورد نظر با کم‌ترین چروکیدگی می‌تواند به‌دست آید. هم‌چنین، بعد از اعتبارسنجی و ارزیابی مدل، بدون نیاز به انجام آزمایش‌های پرهزینه، می‌توان از آن برای موارد مشابه استفاده کرد.

با توجه به این‌که بر اساس اطلاعات موجود، پژوهش‌های بسیار اندکی در زمینه تأثیر پیش‌تیمار امواج فراصوت روی چروکیدگی در فرایند سرخ کردن صورت گرفته است و

1. Ultrasound

شستشوداده شدند و رطوبت اضافی با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. در مرحله بعد نمونه‌های پیش تیمار شده به صورت جدول 1 تهیه شدند. بدون روغن گزارش گردید.

4-2- شرایط سرخ کردن

برای سرخ کردن سیب‌زمینی‌ها از سه دمای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 1، 2، 3 و 4 دقیقه استفاده شد. جهت سرخ کردن نمونه‌ها (جدول 1)، ابتدا سرخ‌کن تا خط نشانه پر از روغن شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ کردن مورد نظر، سرخ‌کن روی حالت اتوماتیک قرار گرفت. سپس، حدود 40-50 گرم نمونه (7-8 قطعه) داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شد و با رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای مورد نظر، سبد حاوی نمونه‌ها، به‌طور اتوماتیک، داخل روغن غوطه‌ور گردید. پس از سرخ شدن به مدت زمان مورد نظر، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور خودکار از سرخ‌کن بیرون آمده و با آژیر سرخ‌کن، نمونه‌ها از سرخ‌کن خارج شدند و سپس روغن اضافی آن‌ها توسط یک کاغذ خشک‌کن گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه روی آن‌ها انجام گردید. روغن مورد استفاده پس از هر هشت بار فرایند سرخ کردن تعویض شد. تمامی آزمایش‌ها با دو تکرار انجام شدند و داده‌های گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

7-2- اندازه‌گیری میزان چروکیدگی

در مرحله اول، حجم ظاهری اولیه و نهایی نمونه‌ها قبل و پس از سرخ شدن با به‌کارگیری روش جابجایی حلال (تولون) با استفاده از پیکنومتر شیشه‌ای و مطابق رابطه 1 محاسبه گردید

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

V: حجم ظاهری اولیه یا سرخ‌شده (cm³)

M: وزن نمونه (g)

M₁: وزن پیکنومتر خالی و حلال (g)

M₂: وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (g)

ρ: چگالی تولون (kg/m³)

در مرحله بعد، با استفاده از حجم ظاهری حاصل از رابطه 1،

5-2- اندازه‌گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها با خشک کردن آن‌ها در آون کنوکسیونی در

جدول (1) علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	1
0.1CMC	پوشش دادن با محلول 0/1٪ کربوکسی متیل سلولوز	2
0.2CMC	پوشش دادن با محلول 0/2٪ کربوکسی متیل سلولوز	3
U	امواج فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز به مدت 15 دقیقه	4
U-0.1CMC	امواج فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز به مدت 15 دقیقه-پوشش دادن با محلول 0/1٪ کربوکسی متیل سلولوز	5
U-0.2CMC	امواج فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز به مدت 15 دقیقه-پوشش دادن با محلول 0/2٪ کربوکسی متیل سلولوز	6

1: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.
2 و 3: نمونه‌هایی که به‌منظور پوشش دادن، در محلول‌های 0/1 و 0/2٪ تهیه شده از کربوکسی متیل سلولوز، به مدت 5 ثانیه به‌طور مجزا غوطه‌ور شدند.
4: نمونه‌هایی که در حمام امواج فراصوت در معرض فرکانس 40 کیلوهرتز به مدت 15 دقیقه قرار گرفتند.
5 و 6: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش تیمار تلفیقی از امواج فراصوت و پوشش خوراکی، ابتدا در حمام امواج فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز به مدت 15 دقیقه قرار داده شدند و سپس به‌طور مجزا در محلول‌های 0/1 و 0/2٪ از پوشش خوراکی به مدت 5 ثانیه غوطه‌ور گردیدند.

تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. برای انجام مقایسه میانگین از آزمون بونفرونی¹ [22] در سطح احتمال 5% ($P < 0/05$) استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- تأثیر شرایط فرایند بر میزان چروکیدگی

شکل 1-الف، تغییرات میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد سرخ‌شده در سه دمای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد را به مدت 1، 2، 3 و 4 دقیقه نشان می‌دهد. میزان چروکیدگی در تمام دماها با افزایش زمان سرخ‌کردن، افزایش یافت و میزان افزایش در چروکیدگی (تغییرات حجمی) با پیشرفت زمان سرخ‌کردن از 1 تا 4 دقیقه، کاهش پیدا کرد. میزان چروکیدگی بر حسب زمان در فواصل زمانی اولیه حالت غیرخطی داشته و با پیشرفت زمان به حالت خطی و ثابت نزدیک‌تر شد. چروکیدگی طی سرخ‌کردن ارتباط بسیار نزدیکی با میزان تغییرات انتقال جرم دارد؛ به این صورت که نمونه‌ها در مراحل اولیه فرایند به علت خروج سریع‌تر رطوبت، متحمل بیش‌ترین میزان چروکیدگی شده، ولی در زمان‌های بالاتر به علت تشکیل یک پوسته سخت، چروکیدگی کاهش یافت [23]. این نتیجه در تطابق با نتایج به‌دست‌آمده توسط تایوو و بیک [12] بود. در بررسی تأثیر دما بر میزان چروکیدگی در منحنی چروکیدگی به‌صورت تابعی از زمان (شکل 1-الف)، مشاهده شد که دماهای بالای سرخ‌کردن باعث افزایش چروکیدگی در زمان‌های یکسان می‌گردد؛ به‌دلیل این‌که در دماهای بالا، میزان خروج رطوبت بیش‌تر از دماهای پایین می‌باشد. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش‌های بیک و میتال [13] و ضیایی‌فر و همکاران [15] هم‌خوانی داشت. شکل 1-ب نیز، منحنی تغییرات میزان چروکیدگی را بر حسب محتوای رطوبت در تیمار شاهد بعد از سرخ‌کردن در دماهای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. مطابق این شکل نیز، میزان چروکیدگی با میزان خروج رطوبت ارتباط مستقیم داشته و با کاهش محتوای رطوبت افزایش یافت. این نتیجه مطابق نتایج به‌دست‌آمده توسط یامسانق سونق و موریرا [24] و ضیایی‌فر و همکاران [15] بود.

میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده از رابطه 2 محاسبه شد [15]

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

$S_{(t)}$: درصد چروکیدگی

V_0 : حجم ظاهری نمونه تازه (cm^3)

$V_{(t)}$: حجم ظاهری نمونه پس از سرخ‌شدن (cm^3)

8-2- اندازه‌گیری چگالی ظاهری

بعد از محاسبه حجم ظاهری نمونه‌ها از رابطه 1، مقادیر چگالی ظاهری به‌صورت گرم بر سانتی‌متر مکعب از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ‌شده محاسبه گردید [15]

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

ρ : چگالی ظاهری محصول (g/cm^3)

M : جرم محصول (g)

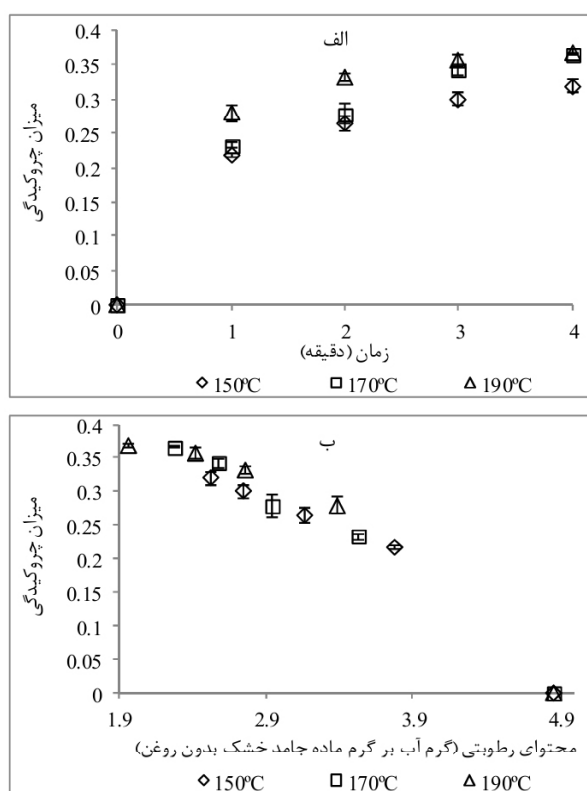
V : حجم ظاهری محصول (cm^3)

9-2- مدل‌سازی ریاضی

مدل‌سازی ریاضی چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده طی فرایند سرخ‌کردن عمیق به‌صورت تابعی از زمان، خروج رطوبت، جذب روغن و چگالی ظاهری با استفاده از مدل‌های تجربی صورت گرفت. این مدل‌ها از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.635, R) به‌دست آمدند. ارزیابی مدل‌ها نیز با استفاده از معیارهای ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد، به این صورت که مدل‌های دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تر به‌عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

10-2- آنالیز آماری

در این مطالعه، 6 تیمار نشان‌داده‌شده در جدول 1 در سه دمای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد و 4 زمان 1، 2، 3 و 4 دقیقه در دو تکرار ($6 \times 3 \times 4 \times 2 = 144$) سرخ شدند. تجزیه و

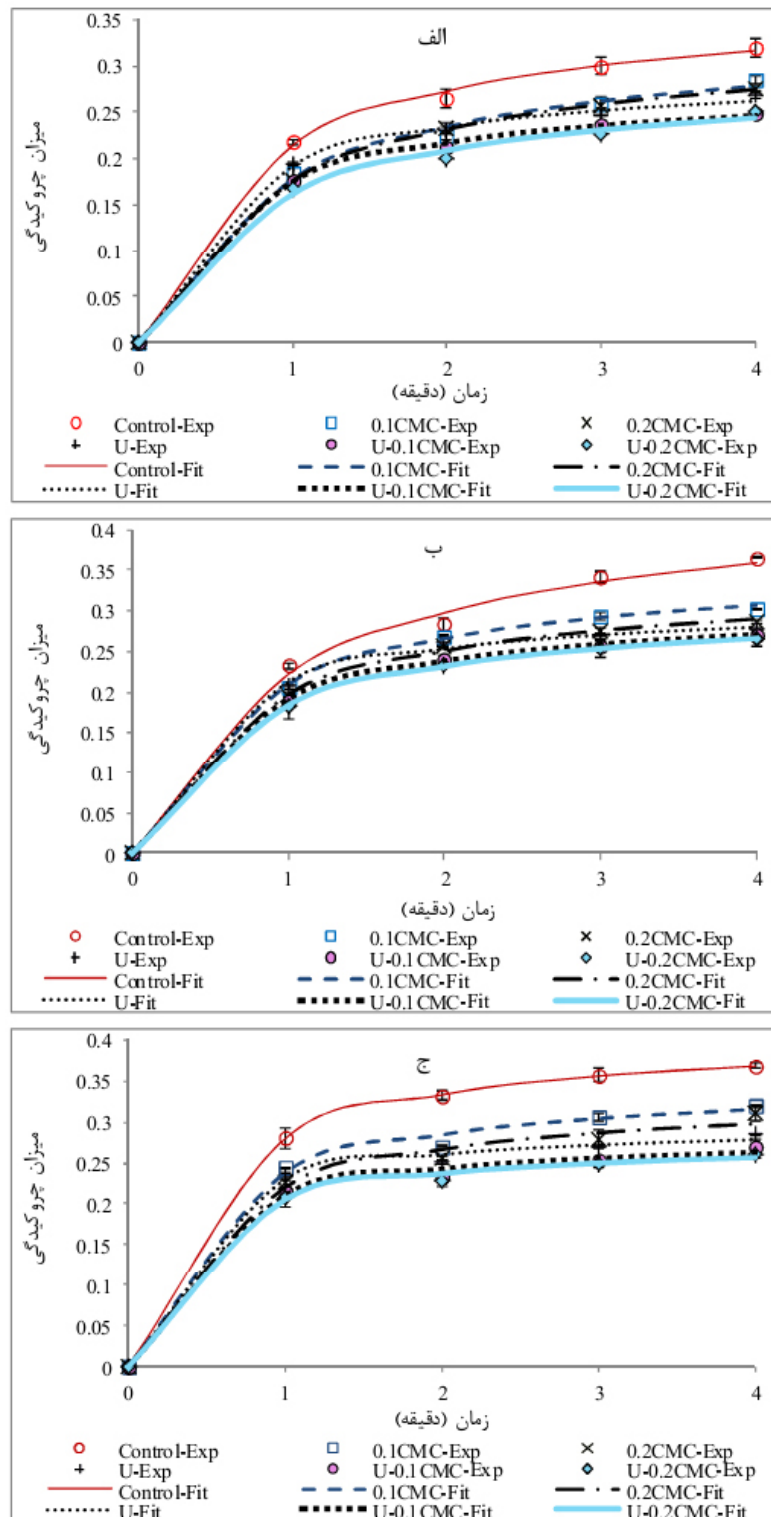


شکل (1) میزان چروکیدگی قطعات سیبزمینی سرخ‌شده (نمونه شاهد) طی فرایند سرخ کردن عمیق در سه دمای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد به صورت تابعی از: الف) زمان، ب) محتوای رطوبت

3-2- تأثیر پیش تیمارها بر میزان چروکیدگی

تحت الشعاع قرار خواهد داد. پیش تیمار پوشش خوراکی میزان چروکیدگی را به دلیل کاهش میزان خروج رطوبت کاهش داد [16]. کاهش میزان چروکیدگی توسط امواج فراصوت را نیز می‌توان به شکل‌گیری کانال‌های ریز میکروسکوپی و ایجاد حالت اسفنجی که باعث تسهیل خروج رطوبت و آسیب کم‌تر به لوله‌های موئین می‌شود، نسبت داد [19]. هم‌چنین، تشکیل زود هنگام پوسته‌ای سفت در اثر خروج سریع‌تر رطوبت، احتمالاً دلیل دیگری برای توجیه کاهش چروکیدگی در استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان پیش تیمار در فرایند سرخ کردن باشد. جدول 2، مقایسه میانگین میزان چروکیدگی را به ترتیب برای 4 زمان (1، 2، 3 و 4 دقیقه)، 3 دما (150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد)، 2 غلظت کربوکسی‌متیل سلولوز و 1 فرکانس امواج فراصوت نشان می‌دهد. زمان و دمای سرخ کردن از لحاظ آماری تأثیر معنی‌داری بر میزان چروکیدگی داشت. میزان چروکیدگی در دمای 150 درجه سانتی‌گراد نسبت به

شکل 2، تغییرات میزان چروکیدگی را به‌صورت تابعی از زمان در تیمارهای مختلف سرخ‌شده در دماهای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. میزان چروکیدگی با افزایش زمان سرخ کردن در تمامی پیش تیمارها افزایش پیدا کرد و با نزدیک شدن به مراحل انتهایی فرایند به حالت تعادلی نزدیک شد. نمونه‌های شاهد در مقایسه با دیگر پیش تیمارها، بیش‌ترین میزان چروکیدگی را در زمان‌های سرخ کردن یکسان از خود نشان دادند. کم‌ترین میزان چروکیدگی نیز متعلق به نمونه پیش تیمار شده با امواج فراصوت پوشش خوراکی 0/2٪ بود و بعد از آن، به ترتیب پیش تیمار امواج فراصوت پوشش خوراکی 0/1٪، امواج فراصوت، پوشش خوراکی 0/2٪ و پوشش خوراکی 0/1٪ کم‌ترین میزان چروکیدگی را داشتند. به دلیل ارتباط مستقیم میزان خروج رطوبت و چروکیدگی [12]، هر عاملی که روی میزان خروج رطوبت مؤثر باشد، چروکیدگی را



شکل (2) تغییرات میزان چروکیدگی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل پیشنهادی شماره 1 جدول 3 حین سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان در دماهای 150 (الف)، 170 (ب) و 190 درجه سانتی‌گراد (ج) در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

جدول (2) مقایسه میانگین میزان چروکیدگی برای پارامترهای مورد استفاده: الف: زمان سرخ کردن؛ ب: دمای سرخ کردن؛ ج: غلظت CMC؛ د: فرکانس امواج فراصوت

الف:				
4	3	2	1	زمان سرخ کردن (دقیقه)
0/2905 ^a	0/2739 ^a	0/2486 ^b	0/2076 ^c	میزان چروکیدگی*
*حروف لاتین متفاوت در هر ردیف، نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5٪ می باشد.				
ب:				
190	170	150		زمان سرخ کردن (دقیقه)
0/2711 ^a	0/2589 ^a	0/2355 ^b		میزان چروکیدگی*
*حروف لاتین متفاوت در هر ردیف، نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5٪ می باشد.				
ج:				
0/2	0/1	0		غلظت CMC (درصد)
0/2397 ^b	0/2486 ^b	0/2772 ^a		میزان چروکیدگی*
*حروف لاتین متفاوت در هر ردیف، نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5٪ می باشد.				
د:				
40	0			فرکانس امواج فراصوت (کیلوهرتز)
0/2368 ^b	0/2735 ^a			میزان چروکیدگی*
*حروف لاتین متفاوت در هر ردیف، نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال 5٪ می باشد.				

4- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که میزان چروکیدگی در تمام نمونه‌های مورد آزمون با افزایش دمای سرخ کردن از 150 تا 190 درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. پیش تیمارهای امواج فراصوت و پوشش خوراکی در هر دو غلظت 0/1 و 0/2٪ میزان چروکیدگی را به‌طور معنی‌داری از لحاظ آماری کاهش دادند. تلفیق دو پیش تیمار مذکور، تأثیر بیش تری در کاهش میزان چروکیدگی در مقایسه با هر کدام از این پیش تیمارها به تنهایی داشت. بنابراین، استفاده از امواج فراصوت می‌تواند با هدف بهبود ویژگی‌های کیفی محصول سرخ شده از جمله کاهش چروکیدگی به‌عنوان یک تکنولوژی نوین در فرایند سرخ کردن مواد غذایی در پژوهش‌های مختلف مورد توجه باشد. در طرف دیگر، تمامی مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش، داده‌های حاصل از آزمایش را برای همه پیش تیمارهای مورد آزمون با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین برآزش کردند. بنابراین، این مدل‌ها می‌توانند مدل‌های پیشنهادی مناسبی جهت کاربرد در شرایط زمانی مختلف و همچنین برای تیمارهای متفاوت طی فرایند سرخ کردن عمیق باشند.

دماهای 170 و 190 درجه سانتی‌گراد افزایش معنی‌داری از لحاظ آماری داشت. علاوه بر این، کاهش میزان چروکیدگی در نمونه‌های پیش تیمار شده با کربوکسی‌متیل سلولز 0/1 و 0/2٪ و همچنین امواج فراصوت نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار بود.

3-3- مدل سازی چروکیدگی

مدل‌های 1-6 جدول 3، مدل‌های تجربی پیشنهادی را نشان می‌دهند که در آن‌ها چروکیدگی به‌صورت تابعی از زمان مدل سازی شده است. علاوه بر این، سه مدل 7، 8 و 9 نیز به‌منظور مدل سازی میزان چروکیدگی به ترتیب به‌صورت تابعی از محتوای رطوبت بدون بعد (M_p)، جذب روغن (Y) و چگالی ظاهری (p) پیشنهاد شد. جدول 4، پارامترهای آماری حاصل از برآزش داده‌های آزمایشی با مدل‌های 1-9 را نشان می‌دهد. تمام مدل‌های پیشنهادی با داشتن پارامترهای آماری مناسب (R^2 بالا و RMSE پایین)، داده‌های آزمایشی را به خوبی برآزش نمودند. علاوه بر این، شکل 2، منحنی‌های برآزش داده‌های آزمایشی نمونه‌های مختلف را با مدل 1 جدول 3 نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل و جدول 4 مشخص است، مدل پیشنهادی 1 به‌عنوان یکی از بهترین مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش به خوبی قادر به برآزش داده‌های آزمایشی بود.

جدول (3) مدل سازی میزان چروکیدگی (S) به صورت تابعی از زمان (t)، محتوای رطوبت بدون بعد (M_t)، جذب روغن (Y) و چگالی ظاهری (ρ)

ردیف	مدل	مرجع
1	$S = t/(at + b)$	پژوهش حاضر
2	$S = abt/(1 + bt)$	پژوهش حاضر
3	$S = \exp(at) - \exp(bt)$	پژوهش حاضر
4	$S = \exp(at^{1/2}) - \exp(bt)$	پژوهش حاضر
5	$S = a + \exp(bt^{1/2})$	پژوهش حاضر
6	$S = t^2/(1 + at^b)$	پژوهش حاضر
7	$S = a \exp(bM_t^c)$	پژوهش حاضر
8	$S = a \exp(Y) + b$	پژوهش حاضر
9	$S = a \exp(-bp^c)$	پژوهش حاضر

جدول (4) پارامترهای آماری حاصل برای مدل های پیشنهادی 1-9 جدول 3

مدل 1	دما (°C)												
	تیمار	150				170				190			
		a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE
				$\times 10^{-3}$				$\times 10^{-3}$				$\times 10^{-3}$	
Control	2/66	2/02	0/99	5/4	2/21	2/25	0/99	11/1	2/43	1/15	1/00	0/99	
0.1CMC	2/92	2/69	0/99	8/0	2/75	2/03	0/99	3/5	2/83	1/38	0/99	9/4	
0.2CMC	2/96	2/73	1/00	0/8	2/90	2/2	0/99	4/6	2/96	1/59	0/99	10/8	
U	3/35	1/87	0/99	5/5	3/19	1/52	0/99	5/1	3/34	1/01	0/99	6/3	
U-0.1CMC	3/51	2/21	0/99	2/9	3/18	2/04	0/99	1/8	3/49	1/27	0/99	7/1	
U-0.2CMC	3/41	2/77	0/99	7/7	3/19	2/25	1/00	0/86	3/57	1/31	0/99	5/2	

مدل 2	دما (°C)												
	تیمار	150				170				190			
		a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE
				$\times 10^{-3}$				$\times 10^{-3}$				$\times 10^{-3}$	
Control	0/376	1/32	0/99	5/4	0/45	0/96	0/99	13/7	0/41	2/11	1/00	0/99	
0.1CMC	0/342	1/08	0/99	8/0	0/36	1/36	0/99	3/5	0/35	2/05	0/99	9/4	
0.2CMC	0/338	1/08	1/00	0/8	0/34	1/33	0/99	4/6	0/34	1/86	0/99	10/8	
U	0/299	1/79	0/99	5/5	0/31	2/10	0/99	5/1	0/30	3/29	0/99	6/3	
U-0.1CMC	0/285	1/58	0/99	2/9	0/31	1/56	0/99	1/8	0/29	2/74	0/99	7/1	
U-0.2CMC	0/293	1/23	0/99	7/7	0/33	1/32	0/99	8/9	0/33	1/96	0/99	8/8	

ادامه جدول (4) پارامترهای آماری حاصل برای مدل‌های پیشنهادی 1-9 جدول 3

مدل 3												
دما (°C)												
تیمار	150				170				190			
	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE
				×10 ⁻³				×10 ⁻³				×10 ⁻³
Control	-0/19	-0/46	0/98	19/9	-0/16	-0/43	0/98	24/7	-0/20	-0/57	0/98	23/0
0.1CMC	-0/19	-0/41	0/98	19/4	-0/20	-0/47	0/99	11/9	-0/21	-0/51	0/97	27/3
0.2CMC	-0/20	-0/42	0/99	12/1	-0/21	-0/46	0/99	10/8	-0/21	-0/49	0/96	28/0
U	-0/23	-0/47	0/97	20/6	-0/23	-0/52	0/99	14/2	-0/24	-0/54	0/96	27/3
U-0.1CMC	-0/23	-0/45	0/98	16/1	-0/22	-0/47	0/99	14/1	-0/24	-0/51	0/96	25/6
U-0.2CMC	-0/21	-0/41	0/97	18/9	-0/20	-0/43	0/97	22/2	-0/22	-0/49	0/96	25/9

مدل 4												
دما (°C)												
تیمار	150				170				190			
	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE
				×10 ⁻³				×10 ⁻³				×10 ⁻³
Control	0/25	0/27	0/99	5/8	0/25	0/25	0/99	10/9	0/33	0/33	0/99	9/4
0.1CMC	0/21	0/23	0/99	6/4	0/25	0/28	0/99	2/1	0/28	0/30	0/99	13/9
0.2CMC	0/21	0/23	0/99	1/9	0/24	0/27	0/99	4/3	0/25	0/28	0/99	14/7
U	0/23	0/26	0/99	8/8	0/26	0/29	0/99	4/5	0/27	0/30	0/99	15/6
U-0.1CMC	0/21	0/25	0/99	4/4	0/23	-0/26	0/99	3/0	0/25	0/28	0/99	13/9
U-0.2CMC	0/19	0/22	0/99	7/1	0/22	0/25	0/99	9/0	0/25	0/28	0/99	12/9

مدل 5												
دما (°C)												
تیمار	150				170				190			
	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE
				×10 ⁻³				×10 ⁻³				×10 ⁻³
Control	-0/97	0/14	0/94	34/9	-0/97	0/16	0/97	31/0	-0/95	0/16	0/90	57/0
0.1CMC	-0/98	0/12	0/96	24/9	-0/97	0/13	0/94	37/0	-0/96	0/14	0/91	45/8
0.2CMC	-0/98	0/12	0/96	26/1	-0/97	0/13	0/94	34/7	-0/97	0/13	0/92	40/3
U	-0/97	0/12	0/92	34/8	-0/96	0/12	0/90	43/7	-0/96	0/12	0/92	39/1
U-0.1CMC	-0/97	0/11	0/93	30/4	-0/97	0/12	0/93	34/5	-0/96	0/12	0/90	42/8
U-0.2CMC	-0/98	0/11	0/96	24/0	-0/97	0/13	0/95	30/2	-0/97	0/13	0/92	40/4



ادامه جدول (4) پارامترهای آماری حاصل برای مدل‌های پیشنهادی 1-9 جدول 3

مدل 6	دما (°C)												
	150				170				190				
	تیمار	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE
				×10 ⁻³					×10 ⁻³				×10 ⁻³
Control	3/73	1/87	0/99	6/7	3/57	1/80	0/99	14/4	2/67	2/00	0/99	7/4	
0.1CMC	4/65	1/80	0/99	7/3	3/79	1/88	0/99	2/6	3/33	1/95	0/99	13/0	
0.2CMC	4/67	1/80	1/00	0/7	4/07	1/87	0/99	3/8	3/67	1/92	0/99	13/1	
U	4/29	1/90	0/99	6/4	3/74	1/96	0/99	2/5	3/48	2/02	0/99	11/0	
U-0.1CMC	4/76	1/87	0/99	3/3	4/24	1/89	0/99	0/9	3/88	1/98	0/99	10/2	
U-0.2CMC	5/22	1/81	0/99	6/9	4/30	1/84	0/99	9/2	3/74	1/93	0/99	11/3	

مدل 7	دما (°C)															
	150					170					190					
	تیمار	a	b	c	R ²	RMSE	a	b	c	R ²	RMSE	a	b	c	R ²	RMSE
					×10 ⁻³					×10 ⁻³						×10 ⁻³
Control	0/31	-3/6	8/9	0/99	19/3	0/37	-3/3	5/7	0/98	26/1	0/36	-4/3	7/6	0/99	10/1	
0.1CMC	0/27	-3/3	9/7	0/98	24/7	0/30	-4/1	8/3	0/99	7/5	0/31	-3/8	7/8	0/99	18/7	
0.2CMC	0/26	-3/5	12	0/99	18/2	0/28	-4/3	8/8	0/99	5/3	0/29	-3/6	8/1	0/99	20/9	
U	0/25	-5/1	19	0/98	18/9	0/27	-3/0	10	0/99	12/7	0/27	-4/4	10	0/99	14/3	
U-0.1CMC	0/23	-5/1	21	0/98	17/9	0/26	-3/0	11	0/99	16/7	0/25	-4/3	11	0/99	16/2	
U-0.2CMC	0/23	-4/8	21	0/97	25/4	0/27	-2/6	10	0/96	25/9	0/28	-3/8	9/6	0/99	20/4	

مدل 8	دما (°C)															
	150					170					190					
	تیمار	a	b	c	R ²	RMSE	a	b	c	R ²	RMSE	a	b	c	R ²	RMSE
					×10 ⁻³					×10 ⁻³						×10 ⁻³
Control	1/44	-1/4	8/9	0/99	4/7	1/49	-1/5	5/7	0/98	25/1	1/42	-1/4	7/6	0/99	7/5	
0.1CMC	1/66	-1/7	9/7	0/99	9/1	1/67	-1/7	8/3	0/99	7/3	1/62	-1/6	7/8	0/99	6/6	
0.2CMC	2/50	-2/5	12	0/99	14/8	2/20	-2/2	8/8	0/98	17/1	1/97	-2/0	8/1	0/99	11/2	
U	2/11	-2/1	19	0/93	49/0	2/11	-2/1	10	0/90	43/3	1/78	-1/7	10	0/93	37/8	
U-0.1CMC	2/83	-2/8	21	0/90	36/8	2/82	-2/8	11	0/97	22/9	2/21	-2/2	11	0/94	32/3	
U-0.2CMC	3/18	-3/2	21	0/95	24/4	2/73	-2/7	10	0/96	29/4	2/45	-2/4	9/6	0/97	25/0	

ادامه جدول (4) پارامترهای آماری حاصل برای مدل‌های پیشنهادی 1-9 جدول 3

مدل 9 تیمار	دما (°C)														
	150					170					190				
	a	b	c	R ²	RMSE	a	b	c	R ²	RMSE	a	b	c	R ²	RMSE
					×10 ⁻³					×10 ⁻³					×10 ⁻³
Control	0/31	5/6	220	0/94	43/0	0/34	0/11	214	0/96	41/9	0/35	0/04	228	0/99	23/4
0.1CMC	0/29	2/8	228	0/96	30/4	0/29	7/32	216	0/98	27/7	0/30	0/03	230	0/97	32/5
0.2CMC	0/28	1/1	235	0/91	39/7	0/28	0/04	219	0/93	44/2	0/28	0/02	229	0/94	41/2
U	0/25	6/3	189	0/96	29/9	0/27	0/29	131	0/99	7/3	0/27	0/01	256	0/99	13/3
U-0.1CMC	0/24	0/9	207	0/91	35/1	0/26	259	100	0/98	18/3	0/25	46/4	126	0/99	17/8
U-0.2CMC	0/23	2/2	196	0/90	51/7	0/26	245	100	0/97	19/8	0/25	18/8	136	0/99	15/7

منابع

- [8] Al-Muhtaseb, A.H., McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. (2004). Shrinkage, density and porosity variations during the convective drying of potato starch gel. In: *14th International Drying Symposium (IDS), Sao Paulo, Brazil*, vol. C, 1604-1611.
- [9] Mayor, L., Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *J. Food Eng.*, 61(3), 373-386.
- [10] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. (2000). Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *J. Food Eng.*, 43(3), 147-154.
- [11] Garayo, J., Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55, 181-191.
- [12] Taiwoa, K.A., Baik, O.D. (2007). Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *LWT - Food Scie. Technol.*, 40, 661-668.
- [13] Baik, O.D., Mittal, G.S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep fat tofu frying. *Food Res. Int.*, 38, 183-191.
- [14] Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. (1999). Effect of microwave drying on some quality properties of
- [1] Moreira, R.G. (2001). Deep fat frying of foods, in: Moreira, R.G., Irudayaraj, J.E. (Eds.), *Food Processing Operations Modeling*, Marcel Dekker: New York, 115-146.
- [2] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. (2000). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *J. Food Eng.*, 44, 39-46.
- [3] Bravo, J., Ruales, N.S.J., Mulet, A. (2009). Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. *Drying Technol.* 27, 782-786.
- [4] Mir-Bel, J., Oria, R., Salvador, M.L. (2009). Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *J. Food Eng.*, 95, 416-422.
- [5] Moyano, P.C., Berna, A.Z. (2002). Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technol.*, 20(7), 1303-1318.
- [6] Yadollahinia, A., Jahangiri, M. (2009). Shrinkage of potato slice during drying. *J. Food Eng.*, 94, 52-58.
- [7] Hernandez, J.A., Pavon, G., Garcia, M.A. (2000). Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food drying kinetics. *J. Food Eng.*, 45, 1-10.

dehydrated products. *Dry. Technol.*, 17, 449-466.

[15] Ziaifar, A.M., Courtois, F., Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *J. Food Process. Eng.*, 33(2), 191-212.

[16] Garcia, M.A., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M., Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Int. Food Sci. Emerging Technol.*, 3(4), 391-397.

[17] Kim, D.N., Lim, J., Bae, I.Y., Lee, H.G., Lee, S. (2011). Effect of hydrocolloid coatings on the heat transfer and oil uptake during frying of potato strips. *J. Food Eng.*, 102, 317-320.

[18] Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S. (2007). Use of ultrasound as pretreatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *J. Food Eng.*, 82, 261-267.

[19] Fernandes, F.A.N., Gallão, M.I., Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *J. Food Eng.*, 90(2), 186-190.

[20] Farid, M., Kizilel, R. (2009). A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying and frying of food products. *Chem. Eng. Process.*, 48, 217-223.

[21] AOAC. 1995. Official Methods of Analysis. Association of official analytical chemists. Arlington, VA.

[22] Steel, R.G.D., Torrie, J.H., Dickey, D.A. (1997). *Principles and Procedures of Statistics: a Biometrical Approach*. McGraw-Hill, New York.

[23] Kawas, M.L., Moreira, R.G. (2001). Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *J. Food Eng.*, 47, 97-107.

[24] Yamsaengsung, R., Moreira, R.G. (2002). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying. Part I: Model development. *J. Food Eng.*, 53, 1-10.