

مدل سازی سینتیک چروکیدگی قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با فراصوت و مایکروویو طی فرآیند سرخ کردن عمیق

جلال دهقان نیا^{1*}، حامد باقری درویش محمد²، بابک قنبرزاده³

1- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
مسئول: (*نویسنده j_deghannya@tabrizu.ac.ir)

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

تاریخ دریافت: 93/11/27

تاریخ پذیرش: 94/03/18

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی اثر شرایط فرآیند و پیش تیمارهای فراصوت و مایکروویو بر میزان چروکیدگی قطعات سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق بود. پیش تیمار فراصوت تحت فرکانسهای 28 و 40 کیلوهرتز و پیش تیمار مایکروویو با توانهای 3 و 6 وات بر گرم، روی قطعات سیب زمینی اعمال شد و سپس این قطعات در دماهای 150، 170 و 190 درجه سانتی گراد و زمانهای 60، 120، 180 و 240 ثانیه سرخ شدند. طبق نتایج، پیش تیمار فراصوت به طور معنی داری ($P < 0/05$) میزان چروکیدگی قطعات سیب زمینی را کاهش داد؛ در حالی که پیش تیمار مایکروویو موجب افزایش معنی دار ($P < 0/05$) چروکیدگی در نمونه ها شد. همچنین، زمان سرخ کردن به عنوان یکی از فاکتورهای مهم فرآیند، اثر معنی داری ($P < 0/05$) بر میزان چروکیدگی داشت؛ به طوری که با افزایش زمان، میزان چروکیدگی افزایش پیدا کرد. همچنین، نتایج نشان داد که اثر دما بر میزان چروکیدگی معنی دار نبود ($P > 0/05$). علاوه بر این، 6 مدل با در نظر گرفتن شرایط فرآیند، برای پیش بینی میزان چروکیدگی ارائه شد و برای ثابت های این مدل ها، مدل های چند متغیره بر اساس آنالیز رگرسیونی چند متغیره به صورت تابعی از شرایط فرآیند (فرکانس فراصوت، توان مایکروویو و دمای فرآیند) به دست آمد.

واژه های کلیدی

توان مایکروویو
رگرسیون چند متغیره
فرکانس فراصوت
کنترل فرآیند

مقدمه

ویژگی های مهم کیفی می باشند که فاکتورهایی مانند شکل، اندازه، مساحت سطح و حجم ویژه را شامل می شوند. عمدتاً این ویژگی ها در اثر انجام فرآیند سرخ کردن دچار تغییراتی می شوند.

کاهش حجم یا چروکیدگی مواد غذایی سرخ شده به عنوان یکی از ویژگی های فیزیکی، تحت تأثیر دما و زمان فرآیند، محتوای رطوبتی و روغن جذب شده قرار می گیرد (Moreira et al., 1999). از این رو، اندازه گیری چروکیدگی در شرایط متفاوت فرآیند و بهینه کردن شرایط مورد نظر و افزایش کیفیت محصول،

مواد غذایی سرخ شده به دلیل دارا بودن ویژگی های بافتی منحصر به فرد از محبوبیت بالایی در میان مصرف کنندگان برخوردارند. پوسته ایجاد شده در سطح مواد غذایی سرخ شده، بسیاری از ویژگی های بافتی این محصولات را فراهم می کند؛ قسمت های داخلی محصول نیز شامل توده جرمی، رطوبت و مواد مغذی است که در ایجاد ویژگی های بافتی محصول نقش دارد (Farinu & Baik, 2005; Varela et al., 1988). ویژگی های هندسی و فیزیکی محصول نیز از

چروکیدگی سیبزمینی شیرین سرخ‌شده بررسی شده است (Taiwo & Baik, 2007). در این مطالعه، ابتدا دیسک‌های سیبزمینی پیش‌تیمارشده در روغن کانولای خالص با دمای 170 درجه سانتی‌گراد به مدت 0/5 الی 5 دقیقه فراوری شدند. نمونه‌های شاهد نسبت به نمونه‌های پیش‌تیمارشده به میزان کمتری دچار چروکیدگی شدند. حداکثر چروکیدگی نمونه‌ها بسته به نوع پیش‌تیمار اعمال‌شده بین 6/7 الی 10/2 درصد گزارش شد. همچنین، بیشترین مقدار تغییرات ضخامت نمونه‌ها در ثانیه 120 فرآیند در مورد نمونه منجمد شده مشاهده شد.

راهکارهای مختلفی برای کاهش جذب روغن در فرآیند سرخ‌کردن مواد غذایی از جمله استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است (Oztop *et al.*, 2007; Ngadi *et al.*, 2013; Sensoy *et al.*, 2009). اجاق مایکروویو جزء لوازم خانگی رایج امروزی است. حرارت‌دادن یا گرم‌کردن دوباره با استفاده از مایکروویو به عنوان یک بخش اساسی از آماده‌سازی مواد غذایی مختلف در منازل تبدیل شده است. در مقایسه با روش حرارت-دهی معمولی، گرم‌کردن با مایکروویو مزایای بسیاری دارد. از جمله این مزایا می‌توان به صرفه‌جویی در مصرف انرژی، نیاز به مدت زمان کوتاه‌تر برای پخت و پز یا گرم‌کردن دوباره، بهبود یکنواختی در گرمایش محصول و حصول ویژگی‌های منحصر به فرد میکروسکوپی و همچنین قابلیت سنتز مواد جدید اشاره کرد. گرمایش مایکروویو تا حد زیادی تحت تأثیر حضور آب در مواد غذایی قرار می‌گیرد. حرارت‌دهی با استفاده از مایکروویو منجر به تبخیر رطوبت یکنواخت در محصول می‌گردد. اطلاعات محدودی در ارتباط با دفع رطوبت و چروکیدگی سیبزمینی پیش‌تیمارشده با مایکروویو حین فرآیند سرخ‌کردن وجود دارد. انتظار می‌رود که محتوای رطوبت اولیه بالای قطعات سیب-زمینی باعث گرمایش سریع محصول در مایکروویو گردد. این امر به دلیل واکنش بین مولکول‌های دو قطبی آب و محیط مایکروویو رخ می‌دهد. اثر حاصل از این گرمایش حجمی³ در نحوه دفع رطوبت نمونه است

اهمیت ویژه‌ای دارد. پدیده چروکیدگی از طریق کاهش حجم ماده غذایی در اثر تبخیر آب طی فرآیند سرخ‌کردن اتفاق افتاده (Krokida *et al.*, 2000) و ضخامت، دانسیته و تخلخل را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Wang & Brennan, 1995; Costa *et al.*, 1997; Krokida *et al.*, 2000; Yamsaengsung & Moreira, 2002). چروکیدگی به صورت یک پدیده سطحی شروع می‌شود؛ زیرا خروج رطوبت ماده غذایی در اثر فرآیند سرخ‌کردن، ابتدا در سطح آن رخ می‌دهد و با ادامه یافتن فرآیند، به درون نمونه‌ها پیشروی می‌کند. زمانی که نرخ خروج رطوبت بالا است، پوسته سریعاً تشکیل می‌شود و پس از آن محصول در اثر کاهش نسبت رطوبت با کمترین میزان چروکیدگی شکل می‌گیرد (Kawas & Moreira, 2001).

در پژوهشی، Kawas و Moreira (2001)، چروکیدگی چیپس تورتیلا¹ سرخ شده در روغن سویا با دمای 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 60 ثانیه را بررسی کردند. در این مطالعه، بخش قابل توجهی از چروکیدگی در چیپس تورتیلا در 5 ثانیه اول فرآیند رخ داد و ضخامت نمونه‌ها به دلیل تشکیل پوسته حدود 40 درصد افزایش پیدا کرد که این افزایش با محتوای رطوبتی نمونه‌ها رابطه‌ای غیرخطی داشت. در مطالعه دیگری، Ngadi و Kassama (2003) بیان کردند که چروکیدگی گوشت مرغ با افزایش زمان سرخ‌کردن، کاهش و با افزایش دما، افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، چروکیدگی قطعات دیسکی شکل توفو² بررسی شده است (Baik & Mittal, 2005). طبق نتایج این مطالعه، قطعات توفوی سرخ شده در دماهای 147 الی 172 درجه سانتی‌گراد، 9 الی 13/5 درصد چروکیده شدند. همچنین، سرخ‌کردن در دما-های بالاتر موجب چروکیدگی بیشتر نمونه‌ها در زمان-های مشابه فرآیند شد. افزایش چروکیدگی در دماهای بالاتر به دلیل نرخ انتقال رطوبت بالاتر نمونه‌ها بود. در مورد همه نمونه‌ها با شرایط مختلف فرآیند، 50 درصد چروکیدگی در یک سوم زمان اولیه فرآیند رخ داد. در پژوهش دیگری، اثر پیش‌تیمارهای مختلف آنزیم‌بری، انجماد، خشک‌کردن با هوا و آب‌گیری اسمزی روی

1- Tortilla

2- Tofu

3- Volumetric heating

ساختار محصول می‌شود. از طریق بررسی ریزساختاری، مشاهده شد که اولتراسوند باعث شکستن⁴ ساختار سلولی و تشکیل خلل و فرج‌های بزرگ‌تر در مقایسه با نمونه‌های تازه می‌گردد. این واقعیت می‌تواند سرعت دفع رطوبت را از طریق ایجاد یک مسیر آسان‌تر برای خروج آب بهبود بخشد و این مسأله به نوبه خود، می‌تواند به انتشار رطوبت بالاتر، زمان خشک‌شدن کمتر و در نتیجه چروکیدگی کمتر منجر شود.

از آن جایی‌که ویژگی‌های فیزیکی مواد غذایی مانند چروکیدگی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در کیفیت مواد غذایی سرخ‌شده می‌باشند، بررسی و پیش‌بینی روند تغییرات این ویژگی‌ها طی فرآیند از طریق مدل‌سازی می‌تواند به بهبود کیفی محصول کمک کند. به‌طور کلی می‌توان مدل‌سازی را ارائه روابطی که یک متغیر وابسته (مانند چروکیدگی) را به یک یا چندین متغیر مستقل (مانند زمان) مرتبط می‌سازد، عنوان کرد. استفاده از چنین مدل‌هایی، پیش‌بینی متغیر مورد نظر طی فرآیند را میسر می‌کند و تولیدکننده را به تولید محصولی با ویژگی‌های مطلوب قادر می‌سازد و در نتیجه شناخت تغییرات ساختاری اتفاق افتاده طی مراحل مختلف فرآیند سرخ‌کردن را برای فهم بهتر تغییرات کیفی بوجود آمده، امکان‌پذیر می‌نماید (Yamsaengsung & Moreira, 2002).

با توجه به مطالعات اندک انجام‌شده در ارتباط با بررسی تغییرات چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن و همچنین، در دسترس نبودن کارهای پژوهشی در مورد تأثیر پیش‌تیمارش فراصوت روی چروکیدگی، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پیش‌تیمارش فراصوت و مایکروویو بر میزان چروکیدگی محصول و مدل‌سازی روند تغییرات آن طی این فرآیند انجام شد.

مواد و روش‌ها

سیب‌زمینی‌های مورد استفاده (رقم آگریا)، از بازار محلی تهیه و قبل از سرخ‌شدن در سردخانه با دمای 8 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی که مخلوطی از روغن‌های

که طی عملیات سرخ‌کردن تأثیر قابل توجهی در میزان جذب روغن از خود برجای می‌گذارد (Ngadi *et al.*, 2009). کاهش جذب روغن در نتیجه بکاربردن پیش‌تیمارش مایکروویو، به کاهش محتوای رطوبتی و تغییرات ساختاری ماده غذایی (از جمله چروکیدگی) نسبت داده می‌شود (Ngadi *et al.*, 2009). بنابراین، با توجه به ارتباط بین چروکیدگی، جذب روغن و محتوای رطوبتی، بررسی میزان چروکیدگی محصول سرخ‌شده در نتیجه استفاده از پیش‌تیمارش مایکروویو لازم است. از پیش‌تیمارش دیگری که در طی سالیان اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، می‌توان به فراصوت¹ با فرکانس بالاتر از 20 کیلوهرتز اشاره نمود. امروزه از این امواج به عنوان پیش‌تیمارش در خشک‌کردن مواد غذایی استفاده می‌شود (Awad *et al.*, 2012). پیش‌تیمارش فراصوت با غوطه‌ورکردن مواد غذایی در آب یا محلول‌های آبی و اعمال امواج فراصوت روی آنها، باعث افزایش ضریب انتقال جرم می‌گردد (Mohammadpour Karizaki *et al.*, 2013). این امواج باعث انقباض و انبساط‌های متوالی در ماده غذایی و در نتیجه منجر به تشکیل حباب (کاویتاسیون²) شده و ترکیدن این حباب‌ها، انتقال جرم را تسهیل می‌کند. دلیل دیگری که سبب افزایش ضریب انتقال جرم در نتیجه بکاربردن امواج فراصوت می‌شود، تشکیل کانال‌های میکروسکوپی در بافت ماده غذایی می‌باشد (Fernandes *et al.*, 2008)؛ بنابراین، به دلیل افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، افزایش سرعت انتشار مولکول‌های آب در حین آب‌گیری و آسیب کمتر به لوله‌های موئین، امواج فراصوت می‌تواند باعث کاهش چروکیدگی محصول شود (Fernandes *et al.*, 2009). در پژوهشی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM³)، اثر اولتراسوند بر ساختار بافتی سیب طی خشک‌کردن مورد مطالعه قرار گرفته است (Rodriguez *et al.*, 2014). تصاویر میکروسکوپی سیب تازه و خشک‌شده نشان داد که چروکیدگی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های ایجادشده طی دفع رطوبت است که منجر به تغییرات عمده در

1- Ultrasound

2- Cavitation

3- Scanning Electron Microscopy

4- Disruption

به طور مجزا قرار گرفتند (نسبت آب به نمونه: 1:4) و سپس در مایکروویو، تحت توان‌های 3 و 6 وات بر گرم به مدت 10 دقیقه، به طور مجزا قرار داده شدند.

شرایط سرخ کردن

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی مطابق جدول 1 در دستگاه سرخ‌کن با دمای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 60، 120، 180 و 240 ثانیه سرخ شدند. نحوه سرخ کردن به این صورت بود که ابتدا سرخ‌کن با 1/5 لیتر روغن پر شده و دما و زمان سرخ‌کن تنظیم شد. با رسیدن دمای روغن به دمای مورد نظر، 100 گرم نمونه در آن قرار داده شده و قطعات سیب‌زمینی سرخ شده با رسیدن زمان سرخ کردن به زمان مورد نظر از سرخ‌کن خارج شدند. نسبت سیب‌زمینی به روغن 0/067 (وزنی - حجمی) در نظر گرفته شد. سپس، روغن سطحی نمونه‌ها با کاغذ جذب گرفته شده و جهت انجام آزمایش‌های مربوطه آماده گردیدند. روغن سرخ‌کن بعد از هر 8 بار سرخ کردن، جهت جلوگیری از تأثیرات تغییرات ویژگی‌های روغن بر جذب روغن تعویض می‌شد (Rahimi & Ngadi, 2014).

محاسبه محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها از طریق خشک کردن در آن با دمای 105 ± 1 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد و در نهایت بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید (AOAC, 1995).

آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه (با نام تجاری بهار) بود، برای سرخ کردن برش‌های سیب‌زمینی بکار برده شد.

تجهیزات

در این پژوهش، از یک سرخ‌کن (Moulinex)، مدل F430.R با ظرفیت 2/2 لیتر روغن، ساخت فرانسه مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده 150 تا 190 درجه سانتی‌گراد، آون مایکروویو (سامسونگ مدل CS4550، ساخت کره) و حمام فراصوت (مدل - USD 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا سیب‌زمینی‌ها شسته و پوست‌گیری شدند. سپس برش‌های سیب‌زمینی با ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2$ سانتی‌متر (ارتفاع، عرض و طول) بوسیله کاتر دستی، تهیه شده و پس از شستشوی نشاسته سطحی با آب مقطر، آب سطحی اضافی توسط کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. قطعات سیب‌زمینی تا زمان انجام پیش‌تیمارها و همچنین تا زمان سرخ کردن در پلیت‌های در بسته جهت جلوگیری از افت رطوبت نگهداری شدند. نمونه‌ها با توجه به نوع پیش‌تیماری که بایستی روی آنها اعمال می‌شد به گروه‌های جداگانه‌ای به صورت زیر تقسیم‌بندی گردیدند (جدول 1):

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

2 و 3: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار مایکروویو، در مایکروویو تحت توان‌های 3 و 6 وات بر گرم به مدت 10 دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

4 و 5: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار فراصوت، در حمام فراصوت در معرض فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز و مدت زمان 15 دقیقه در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، به طور مجزا قرار داده شدند (نسبت آب به نمونه: 1:4).

6، 7، 8 و 9: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش‌تیمارهای فراصوت و مایکروویو، ابتدا در حمام فراصوت در معرض فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز و مدت زمان 15 دقیقه در دمای 25 درجه سانتی‌گراد،

جدول 1- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	1
M3	مایکروویو با توان 3 وات بر گرم	2
M6	مایکروویو با توان 6 وات بر گرم	3
U28	فراصوت با فرکانس 28 کیلوهرتز	4
U40	فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز	5
U28 - M3	فراصوت با فرکانس 28 کیلوهرتز - مایکروویو با توان 3 وات بر گرم	6
U40 - M3	فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز - مایکروویو با توان 3 وات بر گرم	7
U28 - M6	فراصوت با فرکانس 28 کیلوهرتز - مایکروویو با توان 6 وات بر گرم	8
U40 - M6	فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز - مایکروویو با توان 6 وات بر گرم	9

محاسبه چروکیدگی

برای محاسبه چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌ها قبل و پس از سرخ‌شدن، با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولون)، از طریق استفاده از یک پیکنومتر شیشه‌ای و طبق رابطه 1 اندازه‌گیری شد (Ziaifar et al., 2010):

(1)

$$V = \frac{M_1 + M_2 - M_3}{\rho}$$

V: حجم ظاهری نمونه (m³)M₁: وزن نمونه (kg)M₂: وزن پیکنومتر خالی و حلال (kg)M₃: وزن پیکنومتر محتوی نمونه و حلال (kg)ρ: دانسیته حلال مورد استفاده (kg/m³)

سپس، چروکیدگی به صورت نسبت اختلاف حجم نهایی (محصول سرخ‌شده) و حجم اولیه بر حجم اولیه آن (محصول قبل از سرخ‌کردن) از رابطه 2 محاسبه گردید (Krokida et al., 2000):

(2)

$$S = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \times 100$$

S: درصد چروکیدگی

V₀: حجم ظاهری نمونه اولیه (m³)V_t: حجم ظاهری نمونه در زمان t از فرآیند سرخ‌کردن (m³)

صورت تابعی از زمان صورت گرفت (جدول 2). مدل - های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار (MATLAB Version 7.12.635, R2011a) به دست آمدند. ارزیابی مدل‌ها نیز با استفاده از دو معیار ضریب همبستگی (R²) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد؛ به این صورت که مدل‌های دارای R² بالاتر و RMSE پایین‌تر به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

آنالیز آماری

آنالیز آماری مورد استفاده در این پژوهش، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بود. فاکتورها شامل دمای فرآیند سرخ‌کردن (در سه سطح 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد)، زمان فرآیند سرخ‌کردن (در چهار سطح 60، 120، 180 و 240 ثانیه)، فرکانس پیش‌تیمار فراصوت (در دو سطح 28 و 40 کیلوهرتز) و توان پیش‌تیمار مایکروویو (در دو سطح 3 و 6 وات بر گرم) بودند. تأثیر هر کدام از این فاکتورها روی میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی در حین فرآیند آنالیز شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها نیز بر اساس آزمون بونفرونی¹ در سطح احتمال 5 درصد (Steel et al., 1997) انجام گرفت. تمامی آزمایش‌ها در دو تکرار انجام شدند.

مدل‌سازی تجربی

مدل‌سازی تجربی چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، به

جدول 2- مدل سازی چروکیدگی قطعات سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن

شماره	مدل	مرجع
1	$S = (abt)/(1 + bt)$	مدل پیشنهادی این مطالعه
2	$S = a(1 - \exp(-bt))$	مدل پیشنهادی این مطالعه
3	$S = at^b + c$	مدل پیشنهادی این مطالعه
4	$S = a \exp(-bt) + c$	مدل پیشنهادی این مطالعه
5	$S = (1 + t)/(at + b)$	مدل پیشنهادی این مطالعه
6	$S = a + b(t/1 + t)$	مدل پیشنهادی این مطالعه

نتایج و بحث

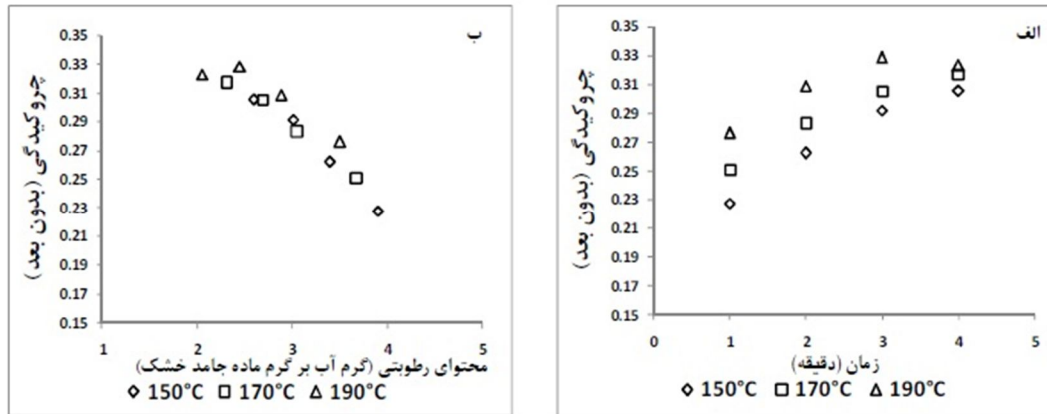
تأثیر شرایط فرآیند و پیش تیمارها بر چروکیدگی

میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد سرخ شده، با افزایش زمان سرخ کردن در دماهای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد، افزایش یافت (شکل 1- الف)؛ ولی نرخ چروکیدگی، با پیشرفت زمان فرآیند کاهش پیدا کرد. این روند با نتایج گزارش شده توسط پژوهشگران دیگر مطابقت دارد (Kawas & Moreira, 2001; Garayo & Moreira, 2002; Moreira & Barrufet, 1998; Baik & Mittal, 2005; Taiwo & Baik, 2007; Ziaifar *et al.*, 2008). چروکیدگی (کاهش حجم) در زمان‌های آغازین فرآیند سرخ کردن، معادل حجم آب خارج شده از ماده غذایی است و با ادامه فرآیند، میزان تغییرات حجم محصول کاهش می‌یابد (Garayo & Moreira, 2002). چروکیدگی ابتدا در سطح ماده غذایی صورت می‌گیرد و در نرخ‌های بالای خروج رطوبت، لایه‌ای سخت در سطح ماده غذایی تشکیل می‌شود که حجم نهایی محصول را تعیین می‌کند. نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در مراحل پایانی فرآیند، حجم محصول با ادامه یافتن کاهش رطوبت، تغییری نمی‌کند (Wang & Brennan, 1995)؛ بنابراین، سخت شدن قسمت خارجی ماده غذایی در اثر ادامه یافتن حرارت-دهی منجر به مقاومت آن در برابر تغییرات حجم می‌شود. از طرف دیگر، چون با افزایش دمای فرآیند نرخ خروج رطوبت افزایش می‌یابد، میزان چروکیدگی محصول نیز افزایش پیدا می‌کند. نتایج حاصل برای چروکیدگی محصول در برابر محتوای رطوبتی نمونه

شاهد در دماهای مختلف نشان داد که با افزایش دمای فرآیند، محتوای رطوبتی نمونه‌ها به مقدار بیشتری کاهش یافته و به تبع آن نمونه‌ها بیشتر دچار چروکیدگی می‌شوند (شکل 1- ب).

مطابق شکل 2، میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ شده شاهد، پیش تیمار شده با فراصوت و میکروویو در دماهای مختلف، با افزایش زمان سرخ کردن افزایش پیدا کرده و با نزدیک شدن به مراحل انتهایی فرآیند، به حالت تعادلی نزدیک شد (به مقدار ثابت رسید). مقادیر چروکیدگی نمونه‌های شاهد در زمان‌های سرخ کردن یکسان و در دماهای مختلف، در مقایسه با نمونه‌های پیش تیمار شده با فراصوت بیشتر ولی در مقایسه با نمونه‌های پیش تیمار شده با میکروویو کمتر بود.

پیش تیمار فراصوت با ایجاد تغییرات ساختاری در بافت ماده غذایی و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و در نتیجه تسهیل خروج رطوبت و آسیب کمتر به لوله‌های موئین، چروکیدگی نمونه‌های پیش تیمار شده را کاهش می‌دهد (Fernandes & Rodrigues, 2007; Fernandes *et al.*, 2008). همچنین تشکیل زود هنگام پوسته‌ای سفت در اثر خروج سریع تر رطوبت، احتمالاً می‌تواند دلیل دیگری برای توجیه کاهش چروکیدگی در اثر استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در فرآیند سرخ کردن باشد. این در حالی است که اعمال پیش تیمار میکروویو با توجه به کاهش شدید محتوای رطوبتی نمونه‌ها، باعث کاهش شدید حجم و در نتیجه چروکیدگی شدن محصول گردید.



شکل 1- میزان چروکیدگی نمونه شاهد در برابر زمان (الف) و محتوای رطوبتی (ب) در دماهای مختلف

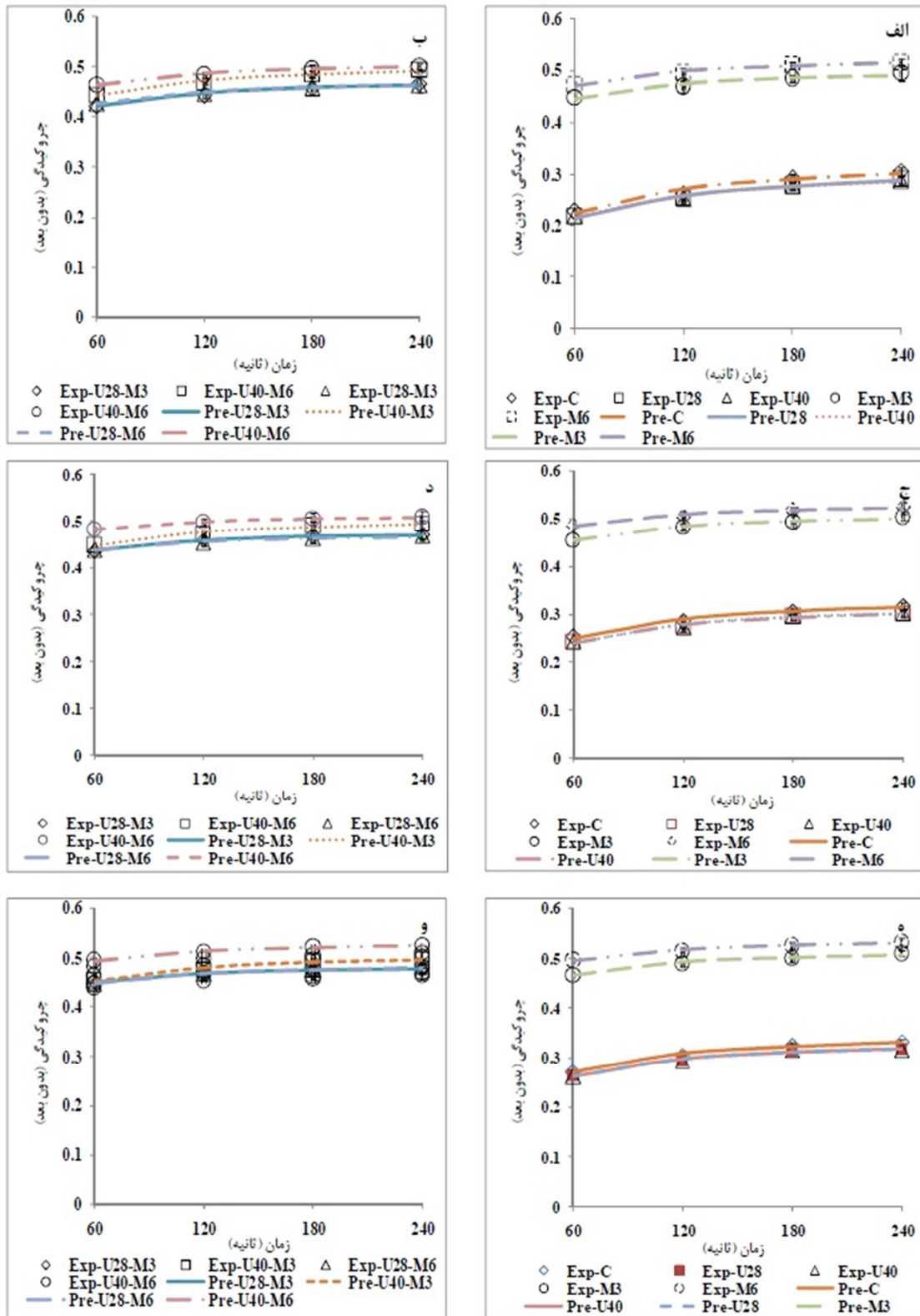
فرآیند سرخ‌کردن، معادل حجم آب خارج شده از ماده غذایی است و با افزایش زمان فرآیند، دفع رطوبت کمتر شده و در نتیجه، میزان تغییرات حجم محصول کاهش می‌یابد. همچنین، میزان چروکیدگی محصول با افزایش دمای فرآیند به دلیل افزایش نرخ خروج رطوبت، افزایش پیدا می‌کند. اعمال پیش‌تیمار میکروویو در توان بالاتر نیز با توجه به کاهش شدید محتوای رطوبتی نمونه‌ها، باعث کاهش شدید حجم و در نتیجه چروکیدگی بیشتر محصول می‌گردد. با در نظر گرفتن اثر متقابل سه فاکتور دما، زمان و توان پیش‌تیمار میکروویو بر میزان چروکیدگی، نتایج نشان داد که تأثیر دما و توان میکروویو بیشتر از زمان فرآیند بود؛ به عبارت دیگر، با افزایش این سه فاکتور، چروکیدگی محصول نیز افزایش پیدا کرد.

مدل‌سازی چروکیدگی

جدول 2، مدل‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده در دماهای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد را برای پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1 نشان می‌دهد. به دلیل عدم وجود مدل‌های تجربی مشابه در کارهای پژوهشی قبلی، تمامی مدل‌های به کار رفته، مدل‌های پیشنهادی در پژوهش حاضر می‌باشند. این 6 مدل از میان مدل‌های برازش‌داده‌شده با داده‌های آزمایشی به عنوان مدل‌هایی که به خوبی توانستند میزان چروکیدگی در زمان‌های مختلف فرآیند را پیش‌بینی کنند، انتخاب شدند.

مطابق جدول 3، میزان چروکیدگی با افزایش دمای فرآیند افزایش معنی‌داری ($P < 0/05$) داشت. همچنین، میزان چروکیدگی نمونه‌ها با افزایش زمان فرآیند، به طور معنی‌داری ($P < 0/05$) افزایش یافت (جدول 4). طبق نتایج، اعمال پیش‌تیمار فراصوت نیز باعث کاهش معنی‌دار ($P < 0/05$) چروکیدگی در نمونه‌های پیش‌تیمارشده گشت (جدول 5). مقایسه بین دو فرکانس این پیش‌تیمار نشان داد که چروکیدگی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فرکانس 40 کیلوهرتز به طور معنی‌داری ($P < 0/05$) بیش از نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فرکانس 28 کیلوهرتز بود. از طرف دیگر، اعمال پیش‌تیمار میکروویو به طور معنی‌داری ($P < 0/05$) میزان چروکیدگی را افزایش داد (جدول 6). با افزایش توان پیش‌تیمار میکروویو از 3 به 6 وات بر گرم، چروکیدگی به میزان بیشتری افزایش یافت و این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار ($P < 0/05$) بود.

اثر متقابل 3 فاکتور دما، زمان و فرکانس پیش‌تیمار فراصوت بر میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده از لحاظ آماری غیرمعنی‌دار ($P > 0/05$) بود (داده‌ها نشان داده نشده است)؛ ولی اثر متقابل دما، زمان و توان پیش‌تیمار میکروویو بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده معنی‌دار ($P < 0/05$) بود (داده‌ها نشان داده نشده است). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل این سه فاکتور نشان داد که میزان چروکیدگی با افزایش دما، زمان فرآیند و توان پیش‌تیمار میکروویو افزایش می‌یابد. همان‌گونه که ذکر شد، چروکیدگی (کاهش حجم) در زمان‌های آغازین



شکل 2- میزان چربی‌گیاهی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده بر اساس داده‌های آزمایشی (Exp) و حاصل از برازش (Pre) با مدل 2 جدول 2 در دماهای 150 (الف، ب)، 170 (ج، د) و 190 (ه، و) درجه سانتی‌گراد در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

جدول 3- مقایسه میانگین چروکیدگی در دماهای مختلف سرخ کردن

190	170	150	دمای سرخ کردن (درجه سانتی‌گراد)
0/4259 ^a	0/4119 ^b	0/4015 ^c	چروکیدگی (بدون بعد)

حروف مشابه در هر ردیف نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

جدول 4- مقایسه میانگین چروکیدگی در زمان‌های مختلف سرخ کردن

240	180	120	60	زمان سرخ کردن (ثانیه)
0/4328 ^a	0/4257 ^a	0/4101 ^b	0/3838 ^c	چروکیدگی (بدون بعد)

حروف مشابه در هر ردیف نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

جدول 5- مقایسه میانگین چروکیدگی در فرکانس‌های مختلف پیش‌تیمار فراصوت سرخ کردن

40	28	0	فرکانس فراصوت (کیلوهرتز)
0/4159 ^b	0/3974 ^c	0/4261 ^a	چروکیدگی (بدون بعد)

حروف مشابه در هر ردیف نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

جدول 6- مقایسه میانگین چروکیدگی در توان‌های مختلف پیش‌تیمار مایکروویو سرخ کردن

6	3	0	توان مایکروویو (وات بر گرم)
0/4861 ^a	0/4717 ^b	0/2816 ^c	چروکیدگی (بدون بعد)

حروف مشابه در هر ردیف نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

مدل‌های مربوطه انجام گرفت. در جدول 8، مدل‌های چندمتغیره حاصل از آنالیز رگرسیونی چندمتغیره، برای ثابت‌های مدل‌های ارائه‌شده در جدول 2، به صورت تابعی از فرکانس فراصوت، توان مایکروویو و دمای فرآیند آورده شده است. با استفاده از مدل‌های حاصل توسط آنالیز رگرسیونی چندمتغیره برای ضرایب این مدل‌ها، می‌توان فرآیند را با توجه به متغیرهای مختلف ذکرشده کنترل کرده و محصولی با کیفیت مناسب تولید کرد.

جدول 7 نیز نتایج آماری مدل‌های پیشنهادی ارائه‌شده در جدول 2 را در شرایط مختلف آزمایشی نشان می‌دهد. طبق نتایج این جدول، از میان 6 مدل پیشنهادشده، مدل 4 بهترین مدل برای پیش‌بینی روند چروکیدگی طی فرآیند سرخ کردن می‌باشد. علاوه بر این، در مرحله بعد با هدف بدست آوردن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای فرآیند (فرکانس فراصوت، توان مایکروویو و دمای فرآیند)، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چندمتغیره روی ضرایب تمامی

جدول 7- داده‌های آماری حاصل برای مدل‌های 1-6 جدول 2 در دماها و تیمارهای مختلف

دما (°C)						مدل 1
190		170		150		تیمار
RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	
1/97	0/99	3/99	0/99	5/55	0/99	Control
3/07	0/99	3/26	0/99	3/6	0/99	U28
3/32	0/99	3/73	0/99	3/94	0/99	U40
3/72	0/97	3/17	0/98	4/84	0/96	M3
1/19	0/99	2/04	1	4/77	0/96	M6
4/9	0/96	4/04	0/97	3/87	0/98	U28-M3
1/16	0/99	3/08	0/96	2/62	0/98	U28-M6
1/21	0/99	3/13	0/96	2/69	0/98	U40-M3
1/5	0/99	1/09	0/99	2/17	0/99	U40-M6

ادامه جدول 7

دما (°C)						مدل 2
190		170		150		تیمار
RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	
3/15	0/96	2/95	0/96	1/11	0/99	Control
2/99	0/96	2/69	0/96	0/884	0/99	U28
0/256	0/97	0/622	0/99	0/961	0/99	U40
9/54	0/82	9/47	0/86	9/12	0/80	M3
8/42	0/80	9/47	0/79	9/12	0/85	M6
5/3	0/87	4/99	0/93	10/6	0/79	U28-M3
5/95	0/89	7/36	0/80	7/85	0/84	U28-M6
11/1	0/79	9/9	0/84	10/6	0/84	U40-M3
5/96	0/87	5/12	0/87	7/51	0/86	U40-M6

دما (°C)						مدل 3
190		170		150		تیمار
RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	
7/44	0/99	7/02	0/99	8/77	0/99	Control
6/85	0/99	8/46	0/99	12/4	0/99	U28
8/23	0/99	6/33	0/99	13/4	0/99	U40
0/64	1	2/37	0/98	1/81	1	M3
1/86	1	0/98	0/99	2/35	0/97	M6
2/12	0/92	4/57	0/97	2/37	1	U28-M3
5/1	0/96	0/16	1	1/42	0/99	U28-M6
2/54	0/99	7/5	0/95	1/66	0/99	U40-M3
4/05	0/97	2/23	0/98	1/9	0/99	U40-M6

دما (°C)						مدل 4
190		170		150		تیمار
RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	
8/57	0/99	11/6	0/99	13/5	0/99	Control
8/52	0/99	9/57	0/99	10/8	0/99	U28
8/36	0/99	10/3	0/99	11	0/99	U40
1/47	0/99	2/32	0/99	0/12	1	M3
0/06	1	0/41	1	0/93	0/99	M6
0/44	0/99	0/8	1	0/41	0/99	U28-M3
0/9	0/99	0/37	0/99	0/03	1	U28-M6
1/25	0/99	3/58	0/99	0/53	1	U40-M3
0/82	0/99	0/24	1	0/42	1	U40-M6

ادامه جدول 7

مدل 5						تیمار
دما (°C)						
190		170		150		
RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	
9/2	0/99	7/86	0/99	7/94	0/99	Control
8/76	0/99	8/83	0/99	6/37	0/99	U28
10	0/99	7	0/99	7/38	0/99	U40
4/45	0/96	6/09	0/94	4/28	0/97	M3
3/75	0/96	3/75	0/96	6/02	0/93	M6
4/21	0/92	6/79	0/87	3/73	0/97	U28-M3
1/11	0/99	3/04	0/96	2/56	0/98	U28-M6
4/45	0/97	7/29	0/91	5/97	0/95	U40-M3
1/46	0/99	1/05	0/99	2/11	0/99	U40-M6

مدل 6						تیمار
دما (°C)						
190		170		150		
RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	R ²	
3/04	0/96	2/55	0/97	1/77	0/98	Control
3/05	0/96	2/49	0/97	1/73	0/98	U28
3/01	0/96	2/53	0/96	1/86	0/98	U40
4/45	0/96	6/09	0/94	4/28	0/97	M3
3/75	0/96	3/75	0/96	6/02	0/93	M6
4/21	0/92	6/79	0/87	3/73	0/97	U28-M3
5/27	0/91	2/81	0/97	4/63	0/94	U28-M6
4/45	0/97	7/29	0/99	5/97	0/95	U40-M3
5/08	0/90	4/18	0/91	5/06	0/93	U40-M6

جدول 8- مدل‌های چندمتغیره برای ثابت‌های مدل‌های جدول 7 بر حسب شرایط فرآیند

مدل	R ²	مدل‌های چندمتغیره برای ثابت‌های مدل‌های جدول 7 بر حسب شرایط فرآیند*
1	%99	a=-0/00025U+0/0307M+0/00212T
	%73	b=0/00119U+0/01105M+0/00044T
2	%99	a=-0/00028U+0/03408M+0/00192T
	%95	b=0/00017U+0/0032M+0/00013T
3	%75	a=-0/00076U+0/10304M+0/00193T
	%80	b=0/00869U-0/9097M+0/026188T
	%78	c=-0/00117U+0/01828M+0/00223T
4	%92	a=4/15 $\times 10^{-5}$ U+0/03607M-0/00156T
	%92	b=5/08 $\times 10^{-5}$ U-0/00273M-0/00012T
	%98	c=-0/00031U+0/03607M+0/00196T
5	%97	a=0/0045U-0/14505M+0/01522T
	%94	b=0/02145U-0/40521M+0/10109T
6	%81	a=1/06 $\times 10^{-5}$ U-0/00218M+6/4 $\times 10^{-5}$ T
	%99	b=-0/00015U+0/01262M+0/002303T

* U، M و T به ترتیب فرکانس فراصوت (کیلوهرتز)، توان مایکروویو (وات بر گرم) و دمای فرآیند (درجه سانتی‌گراد) می‌باشند.

نتیجه‌گیری

را کاهش می‌دهد؛ اما پیش‌تیمار مایکروویو به طور قابل ملاحظه‌ای موجب افزایش چروکیدگی نمونه‌ها قبل از فرآیند شد و این افزایش به طور معنی‌داری ($P < 0/05$) بیشتر از نمونه شاهد بود. علاوه بر این، از میان 6 مدل بررسی‌شده در این پژوهش برای برآزش داده‌های آزمایشی، مدل 4 جدول 2 با توجه به R^2 بالا و RMSE پایین نسبت به سایر مدل‌ها، به عنوان بهترین مدل جهت پیش‌بینی میزان چروکیدگی انتخاب شد.

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش زمان فرآیند، میزان چروکیدگی نمونه‌ها به طور معنی‌داری ($P < 0/05$) به شکل نمایی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش دما نیز میزان چروکیدگی نمونه‌ها به شکل معنی‌داری ($P < 0/05$) افزایش یافت. در مورد اثر پیش‌تیمارهای فراصوت و مایکروویو نیز نتایج نشان داد که پیش‌تیمار فراصوت به طور معنی‌داری ($P < 0/05$) میزان چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن

منابع

- 1- AOAC. The official methods of analysis. 1995. Association of Official Analytical Chemists. Arlington, VA.
- 2- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D. & Youssef, M. M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: a review. Food Research International, 48 (2): 410-427.
- 3- Baik, O. D. & Mittal, G. S. 2005. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. Food Research International, 38: 183-91.
- 4- Costa, R. M., Oliveira, F. A. R. & Boutcheva, G. 1997. Structural changes and shrinkage of potato during frying. International Journal of Food Science & Technology, 36: 11-23.
- 5- Farinu, A. & Baik, O. D. 2005. Deep fat frying of foods-transport phenomena. Food Reviews International, 21: 389-410.
- 6- Fernandes, F. A. N., Gallão, 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.
- 7- Fernandes, F. A. N., Linhares, F. E. & Rodrigues, S. 2008. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. Ultrasonics Sonochemistry, 15 (6): 1049-1054.
- 8- Fernandes, F. A. N. & Rodrigues, S. 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. Journal of Food Engineering, 82 (2): 261-267.
- 9- Garayo, J. & Moreira, R. 2002. Vacuum frying of potato chips. Journal of Food Engineering, 55: 181-191.
- 10- Kassama, L. S. & Ngadi, M. O. 2003. Density, shrinkage and porosity of deep-fat fried chicken meat. Paper presented at the American Society of Agricultural Engineers, Las Vegas, NV.
- 11- Kawas, M. & Moreira, R. G. 2001. Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. Journal of Food Engineering, 47: 97-107.
- 12- 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 (3): 147-154.

- 13- Mohammadpour Karizaki, V., Sahin, S., Sumnu, G., Hamed Mosavian, M. T. & Luca, A. 2013. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment on deep fat frying of potatoes. *Food and Bioprocess Technology*, 6: 3554-3563.
- 14- Moreira, R. G. & Barrufet M. A. 1998. A new approach to describe oil absorption in fried foods: A simulation study. *Journal of Food Engineering*, 60: 167-175.
- 15- Moreira, R. G., Castell-Perez, M. E. & Barrufet, M. A. 1999. *Deep Fat Frying: Fundamentals and Applications*. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers Inc.
- 16- Oztop, M. H., Sahin, S. & Sumnu, G. 2007. Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. *Journal of Food Engineering*, 79: 83-91.
- 17- Ngadi, M. O., Wang, Y., Adedeji, A. A. & Raghavan, G. S. V. 2009. Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *LWT - Food Science and Technology*, 42: 438-440.
- 18- Rahimi, J. & Ngadi, M. O. 2014. Inter-particle space fractions in fried batter coatings as influenced by batter formulation and pre-drying time. *LWT - Food Science and Technology*, 57 (2): 486-493.
- 19- Rodriguez, O., Santacatalina, J. V., Simal, S., Garcia-Perez, J. V., Femenia, A. & Rossello, C. 2014. Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. *Journal of Food Engineering*, 129: 21-29.
- 20- Sensoy, I., Sahin, S., & Sumnu, G. 2013. Microwave frying compared with conventional frying via numerical simulation. *Food and Bioprocess Technology*, 6: 1414-1419.
- 21- Steel, R. G. D., Torrie, J. H., & Dickey, D. A. 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. New York: McGraw-Hill.
- 22- Taiwo, K. A., & Baik, O. D. 2007. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *LWT - Food Science and Technology*, 40: 661-68.
- 23- Varela, G., Bender A. E., & Morton, I. D. 1988. *Frying of food principles, changes, new approaches*. New York: VCH.
- 24- Wang, N., & Brennan, J. G. 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24: 61-76.
- 25- Yamsaengsung, R., & Moreira, R. G. 2002. Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying. Part I: Model development. *Journal of Food Engineering*, 53: 1-10.
- 26- Ziaifar, A. M., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I., & Trystram, G. 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science & Technology*, 43 (8): 1410-1423.
- 27- 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: 191-212.

Shrinkage kinetic modeling of potato strips pretreated with ultrasound and microwave during deep-fat frying process

Jalal Dehghannya^{1,*}, Hamed Bagheri-Darvish-Mohammad², Babak Ghanbarzadeh³

1-Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding author (j_dehghannya@tabrizu.ac.ir)

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

3-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 effects of process conditions as well as ultrasound and microwave pretreatments on shrinkage of potato strips during deep-fat frying process. Ultrasound pretreatment was performed at frequencies of 28 and 40 kHz and microwave pretreatment was conducted at powers of 3 and 6 W/g on the potato slices. Then, the frying process was done at 150, 170 and 190°C for 1, 2, 3 and 4 min. According to the results, ultrasound pretreatment significantly reduced the shrinkage of potato strips. However, microwave pretreatment resulted in a significant increase in the samples shrinkage. In addition, frying time as an important process factor had a significant effect on shrinkage; such that by increasing time, shrinkage was increased. Moreover, the results showed that temperature effect on shrinkage is not significant. Furthermore, six models were presented in order to predict shrinkage considering the process conditions and for the models constants, multivariate models were obtained based on multivariate regression analysis as a function of process conditions (ultrasound frequency, microwave power and process temperature).

Keywords: Microwave power, Multivariate regression, Process control, Ultrasound frequency