

تأثیر اولتراسوند و مایکروویو بر دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده و مدل‌سازی سینتیک آن

جلال دهقان‌نیا^{۱*}، حامد باقری درویش‌محمد^۲ و بابک قنبرزاده^۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۳

^۱ به‌ترتیب دانشیار و استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: Email: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

چکیده

فرآیند سرخ‌کردن عمیق مواد غذایی یکی از روش‌های متداول پخت می‌باشد. این فرآیند، باعث ایجاد یک‌سری تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی مواد غذایی از جمله دانسیته ظاهری می‌شود. در این پژوهش، اثر شرایط فرآیند (دما و زمان) و پیش- تیمارهای اولتراسوند و مایکروویو بر میزان دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن بررسی شد. پیش- تیمار اولتراسوند تحت فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و پیش‌تیمار مایکروویو با توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم، روی قطعات سیب‌زمینی اعمال گردید و سپس این قطعات در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه سرخ شدند. نتایج نشان داد که پیش‌تیمارهای اولتراسوند و مایکروویو به طور معنی‌داری دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی را نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد. همچنین، دانسیته ظاهری به طور معنی‌داری با افزایش فرکانس اولتراسوند، توان مایکروویو، زمان و دمای فرآیند کاهش یافت. علاوه بر این، ۵ مدل با در نظر گرفتن شرایط فرآیند برای پیش‌بینی میزان دانسیته ظاهری ارائه شد.

واژگان کلیدی: اولتراسوند، سرخ‌کردن، دانسیته ظاهری، مایکروویو، مدل‌سازی

مقدمه

فرآیند، رطوبت از ماده غذایی خارج شده و سیستم متخلخلی در داخل ماده غذایی ایجاد می‌شود (شاهین و سومو ۲۰۰۹). دانسیته ظاهری، یکی از پارامترهایی است که روی میزان تخلخل ماده غذایی مؤثر می‌باشد و در نتیجه می‌تواند ویژگی‌های کمی و کیفی محصول سرخ- شده از جمله میزان جذب روغن و ویژگی‌های بافتی (مانند تردی) آن را تحت تأثیر قرار دهد. ویژگی‌های فیزیکی ماده غذایی مانند دانسیته، چروکیدگی و تخلخل،

سیب‌زمینی یکی از محصولات مهم سرخ‌کردنی می‌باشد. اعمال حرارت روی مواد غذایی با غوطه‌وری آنها در روغن داغ طی فرآیند سرخ‌کردن، تغییرات فیزیکی گسترده‌ای در ماده غذایی ایجاد می‌کند و در نتیجه این تغییرات، کیفیت محصول سرخ‌شده تعیین می‌گردد (موریرا و همکاران ۱۹۹۹، دوبارگاس و همکاران ۲۰۰۰). به دلیل اختلاف فشار بخار آب ایجاد شده طی این

نتیجه بکار بردن امواج اولتراسوند می‌شود، تشکیل کانالهای میکروسکوپی در بافت ماده غذایی می‌باشد (فرناندز و همکاران ۲۰۰۰)؛ بنابراین، می‌توان انتظار داشت اعمال این پیش‌تیمار باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش زمان سرخ‌کردن و همچنین، آسیب کمتر به لوله‌های مؤین موجود در ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن شده و از این طریق، موجب بهبود ویژگی‌های کیفی ماده غذایی سرخ‌شده گردد.

از آنجایی‌که ویژگی‌های فیزیکی مواد غذایی مانند دانسیته ظاهری از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در کیفیت مواد غذایی سرخ‌شده از جمله جذب روغن می‌باشند، بررسی و پیش‌بینی روند تغییرات این ویژگی‌ها در طی فرآیند از طریق مدل‌سازی امری ضروری است. مدل-سازی ریاضی تغییرات ساختاری (از جمله دانسیته ظاهری) به‌عنوان یک ابزار مفید در پیش‌بینی افت رطوبت و جذب روغن به شمار می‌رود (کوستا و همکاران ۲۰۰۷). از طرفی، مطالعات سینتیکی تغییرات کیفی طی فرآیند سرخ‌کردن بسیار مهم هستند؛ چرا که داشتن فهم و دانش صحیح در مورد پارامترهای سینتیکی طی این فرآیند، پیش‌بینی تغییرات کیفی محصول نهایی را ممکن می‌سازد. همچنین، با کمک مدل‌ها می‌توان شرایط مناسب فرآیند را تعیین و انتخاب کرد و کیفیت محصول نهایی را بهبود بخشید. سرعت تغییرات کیفی محصول را می‌توان به فاکتورهای ماده غذایی و فاکتورهای محیطی مرتبط ساخت. از فاکتورهای مهم محصول می‌توان به محتوای رطوبت اشاره کرد و دما و زمان فرآیند نیز از فاکتورهای مهم محیطی هستند (هیندرا و بیک ۲۰۰۶). آنالیز و تعیین کمیت تغییرات ساختاری، برای فهم و مدل‌سازی مکانیسم‌های انتقال (کاهش رطوبت، جذب روغن، انتقال حرارت) طی فرآیند سرخ‌کردن مهم است. پینتوس و همکاران (۱۹۹۵) بیان کردند که دانسیته ظاهری با افزایش زمان فرآیند سرخ‌کردن به صورت خطی کاهش می‌یابد. این پژوهش‌گران، کاهش دانسیته ظاهری را به کاهش رطوبت ماده غذایی نسبت دادند.

فاکتورهای مؤثر روی پدیده‌های انتقال در مواد غذایی سرخ‌شده مانند انتقال حرارت و جرم هستند (وانگ و برنان ۱۹۹۵، کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰، ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸). طی فرآیند سرخ‌کردن، دانسیته ظاهری به دلیل تبخیر آب، توسعه حفره‌های هوا و جذب روغن کاهش می‌یابد (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰). کاواس و موریرا (۲۰۰۱) گزارش کرده‌اند که دانسیته ظاهری چپیس تورتیلا بعد از گذشت ۶۰ ثانیه از زمان فرآیند، از ۸۸۰ به ۵۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش یافت.

یک ماده غذایی با محتوای رطوبت اولیه بالاتر (دانسیته کمتر)، آب بیشتری طی فرآیند سرخ‌کردن از دست داده و در نتیجه، با افزایش میزان تخلخل در آن، می‌تواند میزان روغن بیشتری را جذب کند. بنابراین، استفاده از پیش-تیمارهایی که بتوانند محتوای آب اولیه محصول را کاهش دهند، در نهایت منجر به بهبود ویژگی‌های کیفی محصول سرخ‌شده خواهند شد. به‌عنوان مثال، اعمال پیش‌تیمار مایکروویو قبل از فرآیند سرخ‌کردن، محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها را کاهش داده و موجب کاهش زمان مورد نیاز برای فرآیند می‌شود و در نتیجه، جذب روغن محصول را کاهش می‌دهد (انگدی و همکاران ۲۰۰۹). علاوه بر پیش‌تیمار مایکروویو، پیش‌تیمار دیگری که در طی سالیان اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، پیش‌تیمار اولتراسوند^۱ با شدت بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد. امروزه از این امواج به عنوان پیش‌تیمار در خشک‌کردن مواد غذایی استفاده می‌شود. پیش‌تیمار اولتراسوند با غوطه‌ور کردن مواد غذایی در آب یا محلول‌های آبی و اعمال امواج اولتراسوند روی آنها باعث افزایش ضریب انتقال جرم می‌گردد. همچنین، امواج اولتراسوند باعث انقباض و انبساط‌های متوالی در ماده غذایی و در نتیجه منجر به تشکیل حباب (کاویتاسیون)^۲ شده و ترکیدن این حباب‌ها، انتقال جرم را تسهیل می‌کند. دلیل دیگری که سبب افزایش ضریب انتقال جرم در

^۱ Ultrasound

^۲ Cavitation

دانسیته ظاهری نیز کاهش یافت. همچنین، دمای روغن اثر منفی روی دانسیته ظاهری داشت.

با توجه به مطالعات اندک انجام شده در ارتباط با مدل‌سازی تغییرات دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن و همچنین، در دسترس نبودن کارهای پژوهشی در مورد تأثیر پیش‌تیمار اولتراسوند روی دانسیته ظاهری، این پژوهش، با هدف بررسی تأثیر پیش‌تیمارهای اولتراسوند و مایکروویو و تلفیقی از این دو پیش‌تیمار، بر میزان دانسیته ظاهری محصول صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد

سیب‌زمینی‌های مورد استفاده از بازار محلی تهیه و قبل از سرخ‌شدن در سردخانه بالای صفر درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی که مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه بود، برای سرخ‌کردن سیب‌زمینی‌ها به کار برده شد.

تجهیزات

در این پژوهش، از سرخ‌کن مولینکس (مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°C)، آون مایکروویو (سامسونگ مدل CS4550، ساخت کره)، دستگاه حمام اولتراسوند (مدل USD-4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و همچنین زمان اولتراسونیکاسیون) استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا سیب‌زمینی‌ها شسته شده و پوست‌گیری شدند. سپس برش‌های سیب‌زمینی با ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 1/2$ cm (ارتفاع، عرض و طول)، بوسیله یک کاتر دستی تهیه شده و پس از جدا کردن نشاسته سطحی قطعات سیب‌زمینی بوسیله شستشو با آب مقطر، آب سطحی اضافی توسط کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. نمونه‌ها تا زمان انجام پیش‌تیمارها و فرآیند سرخ‌کردن در پلیت‌های در بسته جهت

موریرا و همکاران (۱۹۹۵) نیز نتایج مشابهی برای چپس تورتیلا طی فرآیند سرخ‌کردن گزارش کرده‌اند.

در پژوهشی دیگر، دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده با روغن پنبه‌دانه، طی فرآیند سرخ‌کردن بررسی شده است (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰). طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه، دانسیته ظاهری طی فرآیند کاهش یافت. همچنین، این پژوهش‌گران با بررسی تأثیر دمای روغن بر میزان دانسیته ظاهری به این نتیجه دست یافتند که دمای روغن اثر معنی‌داری روی ویژگی‌های ساختاری سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش دمای فرآیند، دانسیته ظاهری کاهش پیدا کرد. کاهش دانسیته ظاهری طی فرآیند به کاهش محتوای رطوبت، جذب روغن و توسعه حفره‌های هوا نسبت داده شد و علت کاهش بیشتر آن در دماهای بالاتر، افزایش نرخ خروج رطوبت ذکر گردید.

علاوه بر این، تایو و بیک (۲۰۰۷) دانسیته ظاهری دیسک‌های سیب‌زمینی شیرین پیش‌تیمار شده و سرخ‌شده را در روغن کانولا با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵-۰/۵ دقیقه مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج، دانسیته ظاهری طی فرآیند کاهش یافت؛ به‌طوری‌که دانسیته ظاهری اولیه قطعات بعد از ۵ دقیقه سرخ‌کردن از ۱۲۷۰-۱۱۸۰ به ۹۴۰-۷۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش یافت. همچنین، دانسیته ظاهری با گذشت زمان به صورت خطی کاهش یافت و دلیل آن کاهش قابل توجه محتوای رطوبت ماده غذایی در اثر تبخیر رطوبت بیان شد.

همچنین، ضیایی‌فر و همکاران (۲۰۱۰) در مورد نمونه‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده در دماهای ۱۴۰، ۱۵۵، ۱۷۰ و ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند که دانسیته ظاهری با افزایش زمان کاهش می‌یابد. طبق نتایج این پژوهش-گران، دانسیته ظاهری در مراحل اولیه فرآیند ثابت ماند که دلیل آن برابر بودن میزان رطوبت خارج شده از محصول و چروکیدگی آن ذکر شد؛ ولی در ادامه فرآیند، با کاهش میزان چروکیدگی محصول و ثابت ماندن حجم،

جلوگیری از افت رطوبت نگهداری شدند. قطعات سیب- زمینی با توجه به نوع پیش‌تیماری که بایستی روی آنها اعمال می‌شد، به گروه‌های جداگانه‌ای تقسیم‌بندی شدند (جدول ۱).

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	۱
M3	مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم	۲
M6	مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم	۳
U28	اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز	۴
U40	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز	۵
U28 – M3	اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم	۶
U40 – M3	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم	۷
U28 – M6	اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم	۸
U40 – M6	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم	۹

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

۲ و ۳: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار مایکروویو در آون مایکروویو، تحت توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم به مدت ۱۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار اولتراسوند، در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۱۵ دقیقه، به طور مجزا، قرار گرفتند.

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش‌تیمارهای اولتراسوند و خشک‌کردن، ابتدا در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۱۵ دقیقه، به طور مجزا، قرار گرفتند و سپس در آون مایکروویو، تحت توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم به مدت ۱۰ دقیقه، به طور مجزا، قرار گرفتند.

شرایط سرخ‌کردن

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی مطابق جدول ۱ در دستگاه سرخ‌کن با دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه سرخ شدند. ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شده و دما و زمان سرخ‌کن تنظیم شد. با رسیدن دمای روغن به دمای مورد نظر، ۱۰۰-۱۲۰ گرم نمونه در آن قرار گرفته و قطعات سیب-زمینی سرخ‌شده با رسیدن زمان سرخ‌کردن به زمان مورد نظر از سرخ‌کن خارج شدند. سپس روغن سطحی نمونه‌ها با کاغذ جذب گرفته شده و جهت انجام آزمایش‌های مربوطه آماده شدند. تمامی آزمایشات با ۲ تکرار انجام شد و داده‌های گزارش‌شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

اندازه‌گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌های سرخ‌شده، از طریق خشک‌کردن آنها در آون کنوکسیون در دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد (AOAC ۱۹۹۰) و در نهایت بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

اندازه‌گیری دانسیته ظاهری

برای محاسبه دانسیته ظاهری، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌ها قبل و پس از سرخ‌شدن، با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولوئن)، از طریق استفاده از یک پیکنومتر شیشه‌ای و طبق رابطه زیر اندازه‌گیری گردید (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸):

(R^2) برای انتخاب بهترین رابطه در نظر گرفته شد.

آنالیز آماری

در این پژوهش، یک آزمایش به صورت فاکتوریل بر مبنای طرح کامل تصادفی پیاده شد. ۹ تیمار نشان داده شده در جدول ۱ در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰، ۱۹۰ درجه سانتیگراد و چهار زمان سرخ‌کردن ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در دو تکرار ($2 \times 4 \times 3 \times 9$) مورد فراوری قرار گرفتند. تأثیر هر کدام از این پیش‌تیمارها روی میزان دانسیته ظاهری آنالیز شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون بونفرونی^۵ در سطح احتمال ۵٪ (استیل و همکاران ۱۹۹۷) انجام شد.

نتایج و بحث

اثر شرایط فرآیند و پیش‌تیمارها بر دانسیته ظاهری دما و زمان فرآیند سرخ‌کردن بر میزان دانسیته ظاهری نمونه‌ها اثر منفی داشت (شکل ۱- الف). با افزایش دما، دانسیته ظاهری به طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۲) و دلیل آن افزایش شدت انتقال جرم در دماهای بالاتر و همچنین ایجاد منافذ و فضاهای خالی (افزایش تخلخل) در نمونه‌ها و در نتیجه کاهش بیشتر دانسیته ظاهری می‌باشد (کروکیدا و همکاران ۱۹۹۹). همچنین، اثر دما روی دانسیته ظاهری را می‌توان از روی شکل ۱- ب که دانسیته ظاهری را بر حسب محتوای رطوبت نشان می‌دهد، تشریح کرد. بر این اساس، با افزایش دمای فرآیند، محتوای رطوبت نمونه‌ها و در نتیجه دانسیته ظاهری آن‌ها کاهش یافت. با افزایش زمان فرآیند نیز میزان دانسیته ظاهری به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد (جدول ۳). با افزایش زمان، به دلیل تبخیر رطوبت، توسعه حفره‌های هوا و جذب روغن در ماده غذایی، دانسیته ظاهری کاهش می‌یابد (کروکیدا و همکاران ۱۹۹۹).

$$V = \frac{m_1 + m_2 - m_3}{\rho}$$

V: حجم ظاهری نمونه (اولیه یا سرخ‌شده) (cm^3)

m_1 : جرم نمونه (g)

m_2 : جرم پیکنومتر خالی و حلال (g)

m_3 : جرم پیکنومتر محتوی نمونه و حلال (g)

ρ : دانسیته حلال مورد استفاده (g/cm^3)

با به دست آوردن حجم ظاهری نمونه‌ها از رابطه فوق و داشتن جرم قطعات سیب‌زمینی (خام یا سرخ‌شده)، میزان دانسیته ظاهری نمونه‌ها از طریق رابطه زیر محاسبه گردید (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸):

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

ρ : دانسیته ظاهری نمونه خام یا سرخ‌شده (g/cm^3)

m : جرم نمونه (g)

V: حجم ظاهری نمونه در زمان t از فرآیند سرخ‌کردن (cm^3)

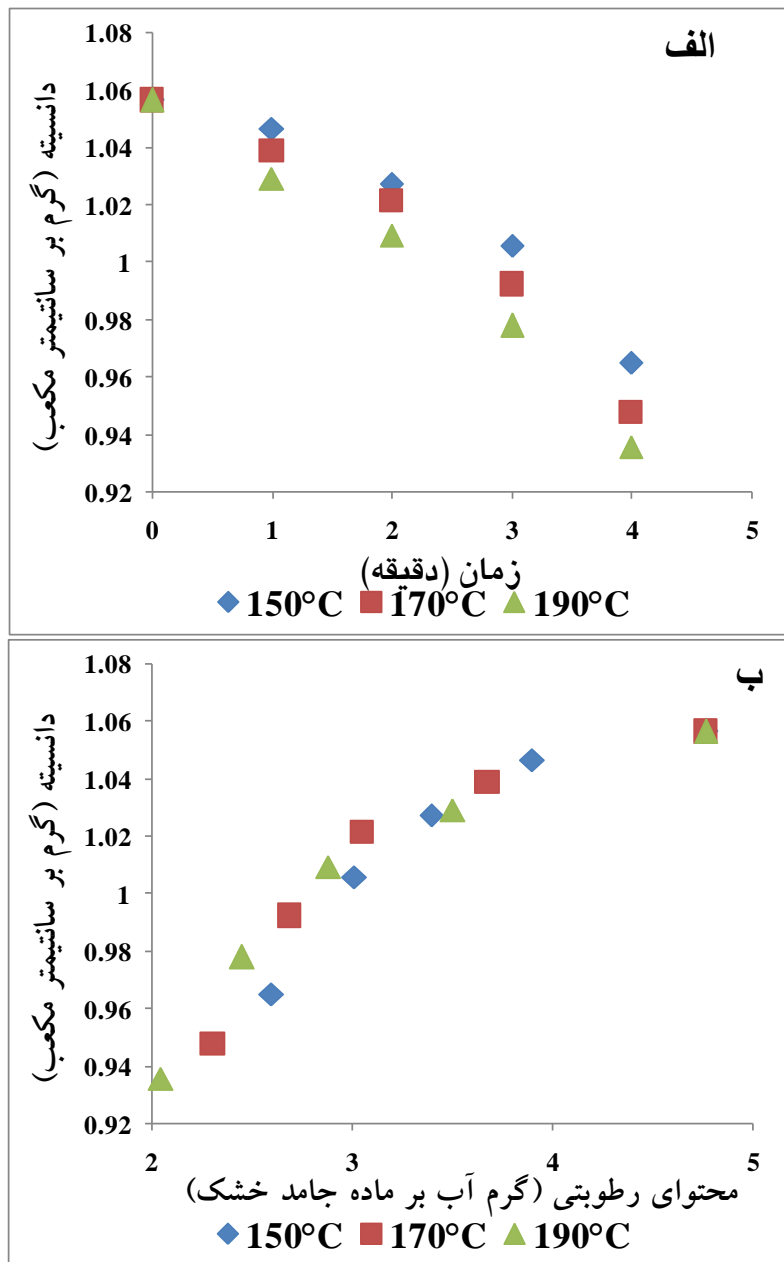
مدل‌سازی ریاضی

در این پژوهش، مدل‌سازی دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق بر حسب زمان صورت گرفت و از پنج مدل تجربی استفاده شد (جدول ۶). پارامترهای مربوط به این مدل‌ها از طریق برازش داده‌های آزمایشی، در نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) برای تعیین بهترین مدل از دو معیار ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) استفاده شد. با توجه به این دو معیار، مدلی که دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تر بود، به عنوان مدل بهتر انتخاب شد. همچنین، به منظور یافتن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرآیند سرخ‌کردن (توان پیش‌تیمار مایکروویو، فرکانس پیش‌تیمار اولتراسوند و دمای فرآیند سرخ‌کردن) از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره^۴ در نرم‌افزار Excel 2007 استفاده و معیار ضریب همبستگی

³ Root Mean Square Error

⁴ Multiple regression analysis

⁵ Bonferroni



شکل ۱- میزان دانشیته ظاهری نمونه شاهد در دماهای مختلف در برابر زمان (الف) و محتوای رطوبت (ب)

جدول ۲- مقایسه میانگین دانشیته ظاهری در دماهای مختلف سرخ کردن

دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۷۰	۱۵۰	۱۹۰
دانشیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۷۳۵۸ ^b	۰/۷۵۳۳ ^a	۰/۷۱۲۸ ^c

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

جدول ۳- مقایسه میانگین دانشیته ظاهری در زمان‌های مختلف سرخ کردن

زمان سرخ کردن (دقیقه)	۱	۲	۳	۴
دانشیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۸۲۱۵ ^a	۰/۷۵۴۳ ^b	۰/۷۰۴۱ ^c	۰/۶۵۶۱ ^d

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

جدول ۴- مقایسه میانگین دانسیته ظاهری در فرکانس‌های مختلف پیش‌تیمار اولتراسوند سرخ‌کردن

فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز)	۰	۲۸	۴۰
دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۷۵۹۸ ^a	۰/۷۳۰۲ ^b	۰/۷۱۱۹ ^c

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

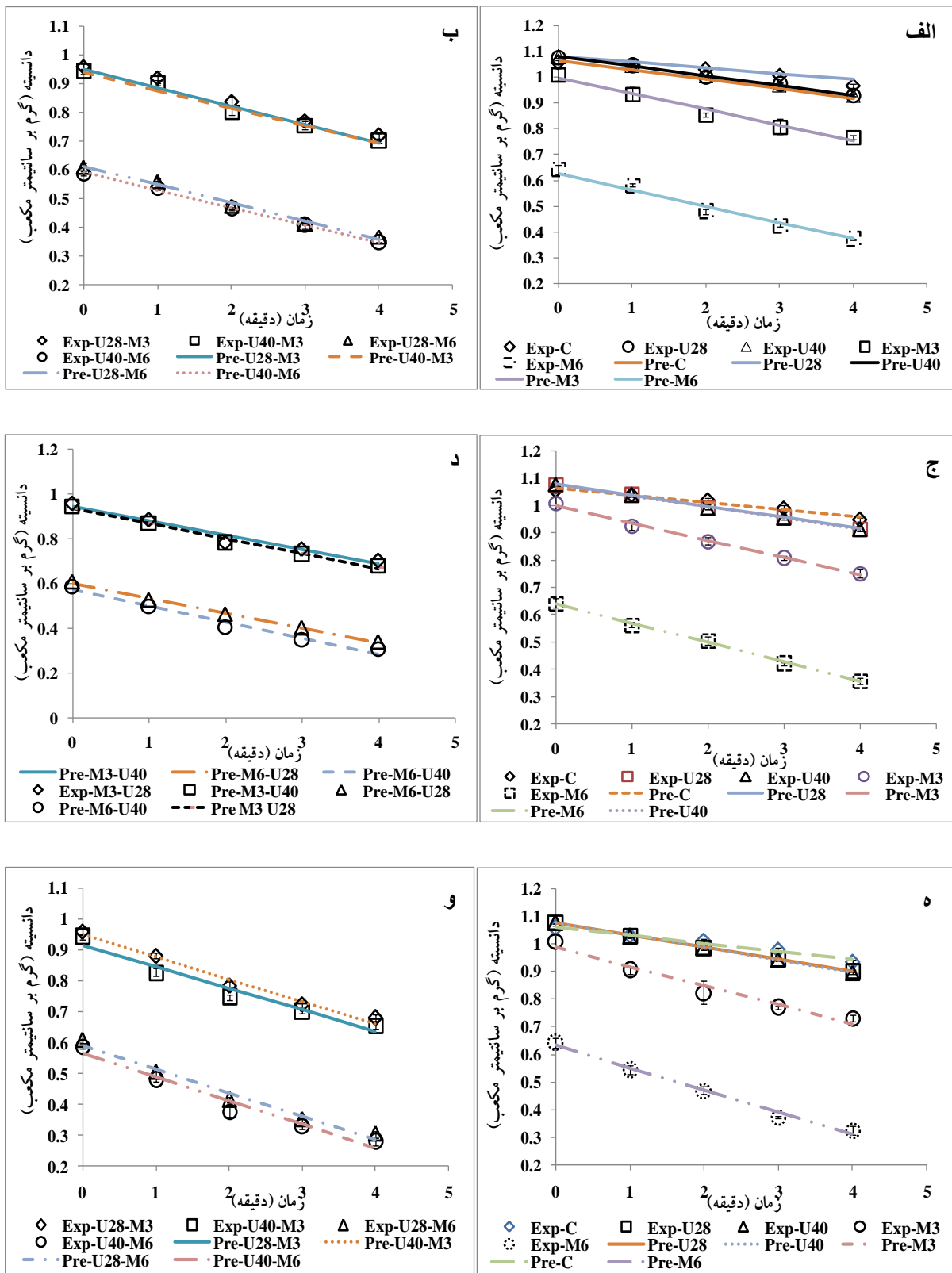
جدول ۵- مقایسه میانگین دانسیته ظاهری در توان‌های مختلف پیش‌تیمار مایکروویو سرخ‌کردن

توان مایکروویو (وات بر گرم)	۰	۳	۶
دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۹۸۳۷ ^a	۰/۷۹۲۵ ^b	۰/۴۲۵۷ ^c

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

مایکروویو در سطوح مختلف (شکل ۲ (ب، د، و))، نتایج نشان داد که اعمال این دو پیش‌تیمار به صورت تلفیقی، دانسیته ظاهری را در مقایسه با نمونه شاهد، کاهش می‌دهد. با افزایش فرکانس پیش‌تیمار اولتراسوند و توان پیش‌تیمار مایکروویو، دانسیته ظاهری نمونه‌ها کاهش بیشتری در مقایسه با نمونه‌های شاهد از خود نشان دادند.

مطابق شکل ۲ (الف، ج، ه)، دانسیته ظاهری قطعات سیب-زمینی شاهد و پیش‌تیمار شده با اولتراسوند و مایکروویو با افزایش زمان در تمامی دماها به صورت خطی کاهش یافت. طبق نتایج، با افزایش فرکانس اولتراسوند، دانسیته ظاهری نسبت به نمونه شاهد به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد (جدول ۴). افزایش انتقال جرم و نرخ تبخیر رطوبت در نتیجه ایجاد کانال‌های میکروسکوپی (فرناندز و همکاران ۲۰۰۸) در نمونه‌ها و کاهش چروکیدگی در اثر اعمال این پیش‌تیمار را می‌توان دلایل کاهش دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی عنوان کرد. اثر متقابل ۳ فاکتور دما، زمان و فرکانس پیش‌تیمار اولتراسوند روی دانسیته ظاهری معنی‌دار نبود (نتایج نشان داده نشده است)؛ اما با افزایش هر کدام از این ۳ فاکتور، دانسیته ظاهری کاهش پیدا کرد. اعمال پیش‌تیمار مایکروویو نیز به دلیل کاهش شدید محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب‌زمینی، به طور معنی‌داری دانسیته ظاهری نمونه‌ها را کاهش داد (جدول ۵). اثر متقابل ۳ فاکتور دما، زمان و توان پیش‌تیمار مایکروویو اثر معنی‌داری روی دانسیته ظاهری داشت (نتایج نشان داده نشده است)؛ به طوری‌که با افزایش هر کدام از این ۳ فاکتور، دانسیته ظاهری به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. در ارتباط با دانسیته ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت تلفیقی با دو پیش‌تیمار اولتراسوند و



شکل ۲- دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Pre) با مدل ۱ جدول ۶ در ماه‌های ۱۵۰ (الف، ب)، ۱۷۰ (ج، د) و ۱۹۰ (ه، و) درجه سانتی‌گراد در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

جدول ۶- مدل‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن

شماره	مدل	مرجع
۱	$\rho = ax + b$	پژوهش حاضر
۲	$\rho = a \exp(bx)$	پژوهش حاضر
۳	$\rho = 1/(a \exp(bx))$	پژوهش حاضر
۴	$\rho = a(1 + bx)^{x+1}$	پژوهش حاضر
۵	$\rho = a/(1 + bx^2)$	پژوهش حاضر

جدول ۷- داده‌های آماری حاصل برای مدل‌های ۱-۵ جدول ۶ در دماها و تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

مدل ۱						تیمار
دما (°C)						
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	
۰.۷۳۹	-/۹۸	۱/۰۵	-/۹۵	۱/۰۲	-/۹۲	Control
۰/۳۴	-/۹۹	۰/۲۸۳	-/۹۹	۰/۳۱۲	-/۹۹	U28
۰/۳۳	-/۹۹	۰/۲۸۴	-/۹۹	۰/۲۲۴	-/۹۹	U40
۲/۴۹	-/۹۶	۰/۹۱۵	-/۹۹	۱/۶۵	-/۹۷	M3
۱/۵۵	-/۹۸	۰/۷۳۲	-/۹۹	۱/۵۴	-/۹۸	M6
۱/۷۹	-/۹۸	۲/۲۹	-/۹۶	۱/۱۵	-/۹۹	U28M3
۲/۸	-/۹۵	۱/۳۳	-/۹۸	۱/۶۸	-/۹۷	U28M6
۲/۱۸	-/۹۷	۰/۷۱۸	-/۹۹	۱/۱۸	-/۹۸	U40M3
۲/۶۶	-/۹۶	۲/۰۸	-/۹۷	۰/۴۷۳	-/۹۹	U40M6
مدل ۲						تیمار
دما (°C)						
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	
۰/۸۲	-/۹۷	۱/۱۲	-/۹۴	۱/۰۷	-/۹۳	Control
۰/۲۴	-/۹۹	۰/۳۶۷	-/۹۹	۰/۳۶۳	-/۹۹	U28
۰/۳۱۴	-/۹۹	۰/۳۸۵	-/۹۹	۰/۳۳۶	-/۹۹	U40
۱/۸۷	-/۹۷	۰/۵۵۶	-/۹۹	۱/۲۱	-/۹۸	M3
۲/۱۲	-/۹۷	۰/۸۶۷	-/۹۹	۱/۶۷	-/۹۷	M6
۱/۰۴	-/۹۹	۱/۲۷	-/۹۹	۱/۱۹	-/۹۹	U28M3
۱/۲۳	-/۹۹	۱/۸۹	-/۹۷	۱/۳۳	-/۹۸	U28M6
۰/۷۵۶	-/۹۹	۰/۵۰۱	-/۹۹	۱/۱۵	-/۹۹	U40M3
۱/۲۳	-/۹۹	۰/۹۵۴	-/۹۹	۰/۱۰۵	-/۹۹	U40M6
مدل ۳						تیمار
دما (°C)						
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	
۰/۸۲۵۸	-/۹۷	۱/۱۳۲	-/۹۴	۱/۰۷۸	-/۹۳	Control
۰/۲۳۸۲	-/۹۹	۰/۳۷۸	-/۹۹	۰/۳۷۰۶	-/۹۹	U28
۰/۳۲۱۸	-/۹۹	۰/۲۹۰	-/۹۹	۰/۳۴۷۸	-/۹۹	U40

مدل ۴ دما (°C)						تیمار
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	
۰/۱۹۷	-/۸۴	۲/۹۲۱	-/۹۴	۳/۵۷۹	-/۸۸	M3
۴/۴۹	-/۸۹	۳/۵۹۲	-/۹۱	۳/۰۶۷	-/۹۲	M6
۴/۴۴۹	-/۹۰	۳/۶۴۶	-/۹۱	۲/۸۰۸	-/۹۳	U28M3
۴/۸۹۴	-/۸۹	۳/۷۹۱	-/۹۳	۲/۵۹۷	-/۹۵	U28M6
۳/۴۸۹	-/۹۴	۲/۱۶۶	-/۹۷	۱/۶۵۱	-/۹۸	U40M3
۶/۵۱۷	-/۷۹	۵/۷۰۷	-/۸۲	۳/۹۶۸	-/۹۰	U40M6
مدل ۵ دما (°C)						تیمار
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	
۰/۹۱۵	-/۹۷	۰/۴۷۴	-/۹۹	۰/۲۹۷	-/۹۹	Control
۲/۳۵	-/۹۱	۱/۹۳	-/۹۳	۱/۷۹	-/۹۲	U28
۲/۲۶	-/۹۲	۲/۰۹	-/۹۲	۱/۷۱	-/۹۳	U40
۵/۵۵	-/۸۱	۳/۷۱	-/۸۹	۴/۴	-/۸۴	M3
۵/۸۳	-/۸۰	۴/۱۷	-/۸۸	۳/۵۴	-/۹۰	M6
۴/۲۴	-/۹۱	۲/۹۹	-/۹۴	۳/۹۱	-/۹۰	U28M3
۴/۷۶	-/۸۶	۴/۸۵	-/۸۳	۲/۸۵	-/۹۳	U28M6
۴/۹۸	-/۸۷	۳/۳۵	-/۹۲	۳/۱۸	-/۹۲	U40M3
۵/۳۶	-/۸۵	۴/۶۵	-/۸۷	۲/۴۳	-/۹۵	U40M6
مدل ۶ دما (°C)						تیمار
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		
RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	RMSE ($\times 10^{-1}$)	R ²	
۰/۸۷۶	-/۹۷	۰/۴۶۵	-/۹۹	۰/۲۹۸	-/۹۹	Control
۲/۲۲	-/۹۲	۱/۸۲	-/۹۲	۱/۶۹	-/۹۳	U28
۲/۱۳	-/۹۳	۱/۹۶	-/۹۳	۱/۶	-/۹۴	U40
۵/۱۴	-/۸۳	۳/۳۹	-/۹۱	۴/۰۷	-/۸۷	M3
۵/۳۹	-/۸۲	۱/۳۳	-/۹۸	۳/۱۳	-/۹۲	M6
۳/۱۲	-/۹۵	۲/۲۷	-/۹۶	۳/۰۵	-/۹۴	U28M3
۴/۲۴	-/۸۹	۰/۷۰۶	-/۹۹	۲/۴۲	-/۹۵	U28M6
۳/۸۷	-/۹۲	۲/۶۸	-/۹۵	۲/۴	-/۹۵	U40M3
۴/۱۷	-/۹۱	۳/۵۹	-/۹۲	۱/۷۶	-/۹۷	U40M6

پیش‌بینی میزان دانسیته ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. به دلیل عدم وجود مدل‌های تجربی مشابه در کارهای پژوهشی قبلی، تمامی مدل‌های به‌کار رفته، مدل‌های پیشنهادی در پژوهش حاضر می‌باشند. این ه مدل از میان مدل‌های برازش داده شده با داده‌های آزمایشی به عنوان مدل‌هایی که به خوبی توانستند میزان دانسیته ظاهری در زمان‌های مختلف فرآیند را

دلیل این امر را می‌توان به همزمانی تأثیر اولتراسوند در افزایش نرخ خروج رطوبت (در نتیجه ایجاد کانال‌های میکروسکوپی) و کاهش چروکیدگی نمونه‌ها از یک طرف و تأثیر مایکروویو در کاهش شدید محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب‌زمینی از طرف دیگر نسبت داد.

مدل‌سازی

جدول ۶، مدل‌های پیشنهادی پژوهش حاضر برای

آزمایشی می باشد. در جدول ۸ نیز مدل های چند متغیره بر اساس آنالیز رگرسیونی غیرخطی، برای ثابت های مدل های ارائه شده در جدول ۶ بر اساس شرایط فرآیند (دما، توان مایکروویو و فرکانس اولتراسوند) آورده شده است. در این مدل ها (جدول ۸)، متغیرهای M ، U و T به ترتیب فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز)، توان مایکروویو (وات بر گرم) و دمای فرآیند (درجه سانتی-گراد) می باشند. اهمیت به دست آوردن چنین مدل هایی از آنجاست که با استفاده از آنها می توان زمان مناسب برای دستیابی به یک نمونه سرخ شده با میزان دانسیته ظاهری مناسب را به دست آورد. همچنین، لزوم انجام آزمایشات پرهزینه در شرایط مختلف ذکر شده طی فرآیند کاهش می یابد.

پیش بینی کنند، انتخاب شدند. جدول ۷ نیز نتایج آماری مدل های مطالعه شده در این پژوهش در شرایط مختلف آزمایشی را نشان می دهد. تمامی مدل های پیشنهادی با داشتن پارامترهای آماری مناسب (R^2 بالا و RMSE پایین)، داده های آزمایشی را به خوبی برازش نمودند. طبق نتایج این جدول، از میان ۵ مدل پیشنهاد شده، مدل ۱ بهترین مدل برای پیش بینی روند تغییرات دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ کردن می باشد. شکل ۲، منحنی-های برازش داده های آزمایشی دانسیته ظاهری نمونه-های مختلف (بر اساس جدول ۱) سرخ شده در چهار زمان ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه و سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C را با مدل ۱ (جدول ۶) نشان می دهد. همان طور که از این شکل و جدول ۷ مشخص است، مدل پیشنهادی ۱، به خوبی قادر به برازش داده های

جدول ۸- مدل های غیر خطی برای ثابت های مدل های جدول ۶ بر حسب شرایط فرآیند

مدل	R^2	مدل های غیر خطی برای ثابت های مدل های جدول ۷ بر حسب شرایط فرآیند
۱	۸۳٪	$a = -0.00023U + 0.00581M - 0.00015T$ $b = -0.00422U - 0.05212M + 0.0066T$
۲	۹۸٪	$a = -0.00055U - 0.07066M + 0.00646T$ $b = -0.00024U + 0.00563M - 0.00015T$
۳	۹۷٪	$a = 3/35 \times 10^{-10}U + 0.000118M + 4/6 \times 10^{-10}T$ $b = -0.00498U - 0.0507M + 0.00942T$
۴	۹۸٪	$a = -0.00058U - 0.0745M + 0.00632T$ $b = -1/8 \times 10^{-10}U - 1/4 \times 10^{-10}M - 9/5 \times 10^{-10}T$
۵	۹۸٪	$a = -0.00053U - 0.07274M + 0.00632T$ $b = 2/63 \times 10^{-10}U + 2/12 \times 10^{-10}M + 6/7 \times 10^{-10}T$

* M ، U و T به ترتیب فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز)، توان مایکروویو (وات بر گرم) و دمای فرآیند (درجه سانتی گراد) می باشند.

نتیجه گیری

فرکانس پیش تیمار اولتراسوند و همچنین افزایش توان پیش تیمار مایکروویو، میزان کاهش در دانسیته ظاهری بیشتر شد. همچنین، یک مدل خطی با ضریب همبستگی بالا به خوبی توانست روند کاهش دانسیته ظاهری با افزایش زمان فرآیند سرخ کردن را برازش کند. مدل های پیشنهاد شده در این مطالعه، می توانند مدل های مفیدی

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دما و زمان فرآیند سرخ کردن، دانسیته ظاهری نمونه ها کاهش می یابد. علاوه بر این، اعمال پیش تیمارهای اولتراسوند و مایکروویو به طور معنی داری (در سطح پنج درصد) منجر به کاهش دانسیته ظاهری نمونه ها شد. با افزایش

جهت استفاده در فرآیند سرخ‌کردن عمیق در شرایط دمایی و زمانی مختلف باشند و با پیش‌بینی روند تغییرات دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ‌کردن، به کنترل کیفیت محصول نهایی کمک کنند.

منابع مورد استفاده

- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- Costa RM, Oliveira FAR and G Boutcheva, 2001. Structural changes and shrinkage of potato during frying. *International Journal of Food Science & Technology* 36: 11-23.
- Dobarganes C, Márquez-Ruiz G and Velasco J, 2000. Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology* 102: 521-528.
- Fernandes FAN and Rodrigues S, 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering* 82: 261-267.
- Fernandes FAN, Linhares FE and Rodrigues S, 2008. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry* 15: 1049-1054.
- Hindra F and OD Baik, 2006. Kinetics of quality changes during food frying. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 46: 239-58.
- Kawas ML and RG Moreira, 2001. Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering* 47: 97-107.
- Krokida MK, Oreopoulou V and Maroulis ZB, 2000. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering* 43: 147-154.
- Moreira RG, Palau J, Sweat VE and 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.
- Moreira RG, Castell-Perez ME and Barrufet MA, 1999. *Deep Fat Frying: Fundamentals and Applications*. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers Inc.
- Ngadi MO, Wang Y, Adedeji AA and Raghavan GSV, 2009. Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *LWT-Food Science and Technology* 42(1): 438-440.
- Pinthus EJ, Weinberg P and Saguy IS, 1995. Oil uptake in deep fat frying as affected by porosity. *Journal of Food Science & Technology* 60: 767-769.
- Sahin S, and Sumnu G, 2009. *Advances in deep-fat frying of foods*. New York: Taylor & Francis Group.
- Singh RP, Farkas BE, and Mccarthy MJ, 1992. Measurement of oil/water interface in foods during frying. In: *Advances in Food Engineering* 237-246.
- Steel RGD, Torrie JH and Dickey DA, 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. New York: McGraw-Hill.
- Taiwo KA and OD Baik, 2007. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *Food Science & Technology* 40: 661-68.
- Wang N and Brennan JG, 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering* 24: 61-76.
- Ziaifar AM, Achir N, Courtois F, Trezzani I and 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 and Technology* 43: 1410-1423.
- Ziaifar AM, Courtois F and Trystram G, 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering* 33:191-212.

Influence of ultrasound and microwave on apparent density of fried potato strips and its kinetic modeling

J Deghannya^{1*}, H Bagheri-DarvishMohammad², B Ghanbarzadeh¹

Received: November 26, 2015

Accepted: February 02, 2016

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

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

*Corresponding author: E-mail: J_deghannya@tabrizu.ac.ir

Abstract

Deep-fat frying process of foods is one of the common cooking methods. The process causes some changes in physical properties of foods such as apparent density. In this study, the effect of process conditions (temperature and time) as well as ultrasound and microwave pretreatments on apparent density of potato strips during deep-fat frying process was investigated. 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. Results showed that ultrasound and microwave pretreatments significantly reduce the apparent density of potato strips compared to control samples. In addition, apparent density was significantly decreased by increasing ultrasound frequency, microwave power, process time and temperature. Furthermore, five models were presented in order to predict apparent density considering the process conditions.

Keywords: Ultrasound, Frying, Apparent Density, Microwave, Modeling