



## تأثیر فرآوری سیب‌زمینی با پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و مایکروویو روی جذب روغن طی سرخ‌کردن

جلال دهقان‌نیا<sup>۱\*</sup>، حامد باقری درویش‌محمد<sup>۲</sup> و بابک قنبرزاده<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۸

<sup>۱</sup> به‌ترتیب دانشیار و استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه: Email: J\_dehghannya@tabrizu.ac.ir

### چکیده

هدف این پژوهش، بررسی اثر شرایط فرآیند و پیش‌تیمارهای فراصوت و مایکروویو بر جذب روغن قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن بود. در این پژوهش، پیش‌تیمار فراصوت تحت فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و پیش‌تیمار مایکروویو با توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم، روی قطعات سیب‌زمینی اعمال شد و سپس این قطعات در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه سرخ شدند. نتایج نشان داد اعمال پیش‌تیمار فراصوت بسته به دما و زمان فرآیند، جذب روغن را کاهش یا افزایش می‌دهد؛ به‌طوری‌که در دماهای پایین و زمان‌های ابتدایی فرآیند، جذب روغن کاهش یافت ولی در دماهای بالا و در انتهای فرآیند، جذب روغن نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرد. پیش‌تیمار مایکروویو نیز به شکل معنی‌داری جذب روغن قطعات سیب‌زمینی را کاهش داد. با افزایش توان مایکروویو از ۳ به ۶ وات بر گرم، میزان جذب روغن، بیشتر کاهش یافت. علاوه بر این، ۶ مدل شامل ۲ مدل موجود در منابع و ۴ مدل جدید پیشنهادی با در نظر گرفتن شرایط فرآیند، برای پیش‌بینی جذب روغن ارائه شد. طبق نتایج برآزش داده‌های آزمایشی، پیش‌تیمار فراصوت باعث افزایش و پیش‌تیمار مایکروویو باعث کاهش محتوای روغن تعادلی شدند؛ همچنین، پیش‌تیمار فراصوت، ثابت سرعت جذب روغن نمونه‌ها را کاهش ولی پیش‌تیمار مایکروویو، این ثابت را افزایش داد.

**واژگان کلیدی:** امواج فراصوت، امواج مایکروویو، سرخ‌کردن، سیب‌زمینی، مدل‌سازی فرآیند

### مقدمه

توجهی آسکوربیک اسید، تیامین، ریبوفلاوین، فسفر، آهن و کلسیم می‌باشد (دوران و همکاران ۲۰۰۷). یکی از فرآیندهای مهم اعمال‌شده روی سیب‌زمینی جهت پخت آن، فرآیند سرخ‌کردن می‌باشد. سرخ‌کردن، فرآیندی است که در آن ماده غذایی به وسیله غوطه‌ورکردن در روغن‌های داغ (معمولاً دمای بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه

سیب‌زمینی با نام علمی سولانوم توبروسوم (Solanum Tuberosum)، با میزان تولید جهانی حدود ۳۰۰ میلیون تن، یکی از محصولات مهم کشاورزی است. سیب‌زمینی منبعی غنی از ویتامین A بوده و دارای مقدار قابل

همکاران ۲۰۰۹). در پژوهشی، تأثیر پیش‌خشک‌کردن با مایکروویو تحت خلأ روی سرخ‌کردن تحت خلأ چپس سیب‌زمینی بررسی شده است (سانگ و همکاران ۲۰۰۷). در این پژوهش، نمونه‌ها به شکل دیسک‌هایی با قطر ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه و در آب گرم با دمای ۸۵ درجه سلسیوس آنزیم‌بری شدند. پیش‌تیمار خشک‌کردن به مدت ۵ و ۱۰ دقیقه تحت توان مایکروویو ۱۴۶/۵ وات و خلأ ۰/۰۶- مگاپاسکال انجام شد و سپس قطعات سیب‌زمینی تحت خلأ ۰/۰۹- مگاپاسکال در دماهای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه سرخ شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش زمان پیش‌خشک‌کردن، محتوای روغن کاهش یافت. همچنین، با افزایش دما و زمان سرخ‌کردن تحت خلأ، مقدار جذب روغن افزایش پیدا کرد. در پژوهشی دیگر، تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو روی انتقال جرم طی سرخ‌کردن تکه‌های گوشت مرغ بررسی گردید (انگادی و همکاران ۲۰۰۹). در این مطالعه، ابتدا تکه‌های گوشت مرغ با مخلوط خمیری متشکل از آرد گندم، خرده نان گندم، صمغ و نشاسته ذرت پوشش داده شدند. سپس، نمونه‌ها در مایکروویو با توان ۱۴/۱ وات بر گرم، گرم و به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری گردیدند. پس از آن، نمونه‌های پیش‌تیمار شده و شاهد در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۰۰ ثانیه سرخ شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، محتوای رطوبت و میزان روغن نمونه‌ها کاهش یافت که علت آن به کاهش محتوای رطوبت اولیه و تغییرات ساختاری ارتباط داده شد.

از پیش‌تیمارهای دیگری که طی سالیان اخیر حین فرآیندهای انتقال جرم مورد استفاده قرار گرفته است، می‌توان به امواج فراصوت (Ultrasound) با شدت بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز اشاره نمود. امروزه از این امواج به عنوان پیش‌تیمار در خشک‌کردن مواد غذایی استفاده می‌شود. پیش‌تیمار فراصوت با غوطه‌ورکردن مواد غذایی در آب یا محلول‌های آبی و اعمال امواج فراصوت روی

سلسیوس) پخته می‌شود (فارینو و بیک ۲۰۰۸). سرخ‌کردن، فرآیندی پیچیده است که در آن پدیده‌های انتقال حرارت و جرم به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد. حرارت از روغن به ماده غذایی و رطوبت از ماده غذایی به محیط گرم‌کننده یعنی روغن منتقل می‌شود و هم‌زمان ماده غذایی نیز روغن جذب می‌کند (فارینو و بیک ۲۰۰۸). هدف اصلی این فرآیند، تبدیل مواد غذایی تازه به محصولی با کیفیت خوراکی بالا و مطلوب برای مصرف‌کننده می‌باشد. به دلیل کاهش رطوبت مواد غذایی و اعمال حرارت، سرخ‌کردن باعث افزایش عمر نگهداری مواد غذایی می‌گردد (مویانو و همکاران ۲۰۰۲). از محاسن فرآیند سرخ‌کردن، تولید محصولی با عطر و طعم مطلوب و کم هزینه و در نتیجه ارزش افزوده اقتصادی بالا و از معایب مهم آن، جذب روغن است که منجر به چاقی و بیماری‌های قلبی و عروقی می‌گردد (فرید و کیزلیل ۲۰۰۹).

عوامل مختلفی در جذب روغن توسط ماده غذایی دخیل می‌باشند که از جمله آن‌ها می‌توان به ویژگی‌های خود ماده غذایی (رطوبت، چگالی، اندازه، شکل و سطح محصول)، فاکتورهای فرآیند (دما، زمان) و شرایط مرحله سردکردن (دما و سرعت سردکردن) اشاره نمود (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸). راه‌کارهای مختلفی برای کاهش جذب روغن از جمله استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو توسط پژوهش‌گران مختلف بررسی شده است (اوزتوپ و همکاران ۲۰۰۷؛ انگادی و همکاران ۲۰۰۹). امروزه آون‌های مایکروویو جزو تجهیزات معمول خانگی هستند که برای گرم‌کردن مواد غذایی استفاده می‌شوند. این روش گرم‌کردن در مقایسه با روش‌های مرسوم، مزیت‌هایی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به گرم‌کردن یکنواخت‌تر، مصرف انرژی کمتر و صرف زمان کمتر اشاره کرد. کاهش جذب روغن در فرآیند سرخ‌کردن در نتیجه به‌کاربردن پیش‌تیمار مایکروویو، به کاهش محتوای رطوبت اولیه و تغییرات ساختاری ماده غذایی نسبت داده می‌شود (انگادی و

طی سرخ کردن ناگت میگو (Shrimp nugget) صورت گرفت (دهقان‌نصیری و همکاران ۲۰۱۱). در این پژوهش، از مدل ارائه‌شده توسط کروکیدا و همکاران (۲۰۰۰) جهت مدل‌سازی استفاده شده است. برازش داده‌های حاصل با مدل مذکور،  $R^2$  در محدوده ۰/۸۲ تا ۰/۹۹ را برای نمونه‌های مختلف حاصل نمود.

علاوه بر پژوهش‌های مذکور، مطالعات متعدد دیگری در ارتباط با تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف از جمله خشک‌کردن (نقوی و همکاران ۱۳۹۲)، آنزیم‌بری (رزاق‌پور و همکاران ۱۳۹۲)؛ علیزاده زیناب و همکاران (۱۳۹۲)، پوشش‌دهی (رونقی و همکاران ۱۳۹۵) و آبگیری اسمزی (عابدپور و دهقان نیا ۱۳۹۵؛ برمور و همکاران ۱۳۹۵) به صورت تنها و یا در ترکیب با یکدیگر روی ویژگی‌های مختلف سیب‌زمینی سرخ‌شده انجام گرفته است. این در حالی است که بر اساس منابع در دسترس، تاکنون در هیچ پژوهشی، اثر پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و مایکروویو به صورت همزمان بر میزان جذب روغن در فرآیند سرخ‌کردن و کیفیت محصول بررسی نشده است. بنابراین، با توجه به اهمیت کاهش مقدار روغن جذب‌شده در مواد غذایی، هدف از این مطالعه، مدل‌سازی جذب روغن در حین سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی با استفاده از پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و مایکروویو و بررسی اثر متقابل آن‌ها روی میزان جذب روغن بود.

#### مواد و روش‌ها

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

#### تجهیزات

در این پژوهش، 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°C،

آن‌ها، باعث افزایش ضریب انتقال جرم می‌گردد (فرناندز و رودریگوئز ۲۰۰۷؛ فرناندز و همکاران ۲۰۰۸). همچنین، امواج فراصوت باعث انقباض و انبساط‌های متوالی در ماده غذایی و در نتیجه منجر به تشکیل حباب یا کاویتاسیون (Cavitation) شده و ترکیدن این حباب‌ها، انتقال جرم را تسهیل می‌کند.

فرآیند سرخ‌کردن عمیق فرآیندی پیچیده شامل انتقال هم‌زمان جرم و انرژی است. برای طراحی، بهینه‌سازی و پیش‌بینی روند صحیح فرآیندهای صنعتی مثل سرخ‌کردن، مدل‌سازی ریاضی فرآیند امری لازم است. از این رو، داشتن فهم و آگاهی صحیح از فاکتورهای مهم فرآیند جهت مدل‌سازی آن ضروری است (بیلدیز و همکاران ۲۰۰۷). مدل، به پیش‌بینی اثرات یک فرآیند بر روی محصول کمک می‌کند و می‌توان با استفاده از آن، ویژگی‌های محصول نهایی را پیش‌بینی نمود. از طرفی، بعد از اعتبارسنجی و تایید مدل، نیازی به انجام آزمایش‌های بعدی نخواهد بود (براو و همکاران ۲۰۰۹). از مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی جذب روغن قطعات سیب‌زمینی استفاده شده است. در پژوهشی، یک رابطه سینتیکی نمایی برای مدل‌سازی جذب روغن به‌کار برده شده است (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰). در این مطالعه، اثر پارامترهای فرآیند، شامل دمای روغن و ضخامت نمونه‌ها روی ثابت سرعت و مقدار روغن تعادلی جذب‌شده بررسی شد. طبق نتایج، تأثیر این دو فاکتور بر پارامترهای مذکور معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که مقدار روغن تعادلی نمونه‌ها با کاهش ضخامت نمونه‌ها و افزایش دما، افزایش یافت ولی ثابت سرعت جذب روغن با کاهش ضخامت نمونه‌ها و افزایش دما، کاهش پیدا کرد. در پژوهشی دیگر، جذب روغن چیپس سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده طی سرخ‌کردن عمیق تحت خلأ، مدل‌سازی شده است (ترونکوزو و پدرسچی ۲۰۰۹). طبق نتایج ارائه‌شده، این مدل‌سازی، هم در مورد نمونه‌های شاهد و هم در مورد نمونه‌های سرخ‌شده تحت خلأ نتیجه خوبی داشته است. در پژوهش دیگری، مدل‌سازی انتقال جرم

انجام پیش‌تیمارها و سرخ‌کردن در ظرف‌های دربسته جهت جلوگیری از افت رطوبت نگهداری شدند و با توجه به نوع پیش‌تیمار به گروه‌های جداگانه‌ای تقسیم‌بندی گردیدند (جدول ۱). با توجه به این که منابع بسیار کمی در ارتباط با کاربرد پیش‌تیمار مایکروویو در فرآیند سرخ‌کردن وجود دارد، توان و زمان اعمال مایکروویو به صورت آزمون و خطا توسط آزمایش‌های مقدماتی انتخاب شدند؛ به این صورت که اعمال امواج مایکروویو در توان و زمان مورد استفاده، سبب سوختن محصول نگردد.

دستگاه مایکروویو (سامسونگ مدل CS4550، ساخت کره) و دستگاه حمام فراصوت (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان) استفاده شد.

### آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا سیب‌زمینی‌ها شسته شده و پوست‌گیری شدند. سپس برش‌های سیب‌زمینی با ابعاد  $1/2 \times 1/2 \times 4 \text{ cm}^3$  (ارتفاع، عرض و طول)، به‌وسیله یک رنده دستی، تهیه شده و پس از جداکردن نشاسته سطحی قطعات سیب‌زمینی از طریق شستشو با آب مقطر، آب سطحی توسط کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. قطعات سیب‌زمینی تا زمان

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	فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز	۴
U40	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز	۵
U28 - M3	فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم	۶
U40 - M3	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم	۷
U28 - M6	فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم	۸
U40 - M6	فراصوت 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 دستگاه مایکروویو تحت توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم به مدت ۱۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند (میزان توان اعمالی مایکروویو بر اساس نسبت توان خروجی مایکروویو (وات) به وزن ماده غذایی (گرم) در نظر گرفته شد (ادجی و همکاران ۲۰۰۹)).

۴ و ۵: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار فراصوت در دستگاه حمام فراصوت در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۱۵ دقیقه، به طور مجزا، قرار گرفتند (دهقان‌نیا و همکاران ۲۰۱۶؛ دهقان‌نیا و عابدپور ۲۰۱۷).

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

### شرایط سرخ‌کردن

مورد استفاده، دارای سنسور دمایی (ترموستات) توکار (Built-in temperature sensor) برای کنترل ترمواستاتیکی دما بود. معمولاً، این سرخ‌کن‌ها دارای دقت  $\pm 3$  درجه سلسیوس هستند (کریری و همکاران،

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی مطابق جدول ۱ در دستگاه سرخ‌کن با دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه سرخ شدند. سرخ‌کن

علاوه بر مدل فوق، مدل پیشنهاد شده توسط کروکیدا و همکاران (۲۰۰۰)، مدل ۲ جدول ۲ نیز بررسی شد. همچنین، علاوه بر دو مدل اشاره شده، مدل‌های دیگری با داده‌های آزمایشی حاصل از پژوهش حاضر بررسی و ۳ مدل جدید به عنوان مدل‌های پیشنهادی این مطالعه ارائه شدند (مدل‌های ۳، ۴، ۵ جدول ۲). انتخاب مدل‌ها بر اساس دارا بودن بالاترین  $R^2$  و پایین بودن RMSE بود. ضرایب مدل‌ها از جمله محتوای روغن تعادلی ( $O_{eq}$ ) و ثابت سرعت جذب روغن ( $K$ ) از طریق برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار (MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست آمد. همچنین، ضرایب مدل‌های مختلف با استفاده از رگرسیون چندمتغیره توسط نرم‌افزار EXCEL 2007 بر اساس شرایط فرآیند (دما، توان مایکروویو و فرکانس فراصوت) مدل‌سازی شد.

جدول ۲- مدل‌سازی جذب روغن قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن

شماره	مدل*	مرجع
۱	$(abx)/(1 + bx)$	مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶)
۲	$a(1 - \exp(-bx))$	کروکیدا و همکاران (۱۹۹۹)
۳	$ax^b$	مدل پیشنهادی این مطالعه
۴	$a \exp(-bx) + c$	مدل پیشنهادی این مطالعه
۵	$(1 + x)/(ax + b)$	مدل پیشنهادی این مطالعه

\*  $a$ ،  $b$  و  $c$ ، ضرایب مدل‌ها و  $x$ ، زمان فرآیند سرخ کردن است.

### انرژی فعال‌سازی

با استفاده از مدل آرنیوس، وابستگی محتوای روغن تعادلی با دمای فرآیند سرخ کردن بررسی شد:

$$O_{eq} = O_0 \exp(-E_a/RT)$$

$O_0$ : ضریب پیش‌نمایی

$E_a$ : انرژی فعال‌سازی (J/mol)

$R$ : ثابت جهانی گازهای کامل (۸/۳۱۴۴۱ J/mol K)

$T$ : دما بر حسب درجه کلین (K)

۲۰۱۰). ابتدا سرخ کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شده و دما و زمان سرخ‌کن تنظیم شد. با رسیدن دمای روغن به دمای مورد نظر، ۱۲۰-۱۰۰ گرم نمونه در آن قرار گرفته و قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده با رسیدن زمان سرخ‌کردن به زمان مورد نظر از سرخ‌کن خارج شدند. سپس، روغن سطحی نمونه‌ها با کاغذ جاذب گرفته شده و جهت انجام آزمایش‌های مربوطه آماده گردیدند. روغن سرخ‌کن هر ۸ ساعت یکبار جهت جلوگیری از تأثیرات تغییرات ویژگی‌های روغن بر جذب روغن تعویض می‌شد.

### محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها، از طریق خشک‌کردن آن‌ها در آون همرفتی در دمای  $105 \pm 1^\circ C$  تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد و در نهایت بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک گزارش گردید (AOAC، ۱۹۹۵).

### محتوای روغن

سنجش میزان روغن نمونه‌های سرخ‌شده توسط استخراج روغن نمونه‌ها در دستگاه سوکسله با حلال اتر نفت صورت گرفت و نتایج به شکل گرم روغن بر گرم ماده خشک گزارش شد (AOAC، ۱۹۹۵). لازم به ذکر است هر آزمایش در دو تکرار انجام گرفت و میانگین دو تکرار به عنوان نتیجه گزارش شد.

### مدل‌سازی تجربی جذب روغن

یکی از مدل‌های به‌کاربرده شده در این پژوهش، مدل تجربی مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶) برای پیش‌بینی روند جذب روغن بود (جدول ۲):

$$O = (O_{eq} Kt)/(1 + Kt)$$

$O$ : محتوای روغن در زمان  $t$  (گرم روغن بر گرم ماده جامد بر پایه خشک)

$O_{eq}$ : میزان روغن در زمان  $t = \infty$  (گرم روغن بر گرم ماده جامد بر پایه خشک)

$K$ : ثابت سرعت جذب روغن (1/s)

$t$ : زمان سرخ‌کردن (s)

تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون بونفرونی (Bonferroni) در سطح احتمال ۵٪ انجام شد (استیل و همکاران ۱۹۹۷).

### نتایج و بحث

#### تأثیر شرایط فرآیند و امواج فراصوت و مایکروویو روی جذب روغن

جدول ۳، مقایسه میانگین جذب روغن در دماهای مختلف سرخ‌کردن را نشان می‌دهد. میزان جذب روغن با افزایش دما از ۱۵۰ به ۱۷۰ درجه سلسیوس به طور معنی‌داری افزایش یافت؛ اما افزایش دما از ۱۷۰ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس جذب روغن را کاهش داد؛ هر چند این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۱-الف). در رابطه با اثر دمای فرآیند سرخ‌کردن بر میزان جذب روغن پژوهش‌گران مختلف، نتایج متفاوتی گزارش کرده‌اند. عده‌ای از پژوهش‌گران معتقدند که با افزایش دمای سرخ‌کردن، جذب روغن کاهش می‌یابد و علت آن را تشکیل سریع پوسته و تغییرات بافتی ماده غذایی بیان نموده‌اند و پوسته ایجادشده را به عنوان مانعی در برابر جذب روغن معرفی کرده‌اند (مویانو و پدرسچی ۲۰۰۶؛ شاهین و سومنو ۲۰۰۹؛ سورگی و همکاران ۲۰۱۲). در صورتی‌که عده‌ای دیگر از پژوهش‌گران بر این باورند که محتوای نهایی روغن به طور مستقیم تحت تأثیر دمای فرآیند نیست؛ بلکه بیشتر به محتوای رطوبت و کاهش رطوبت ماده غذایی وابسته است (الدیرانی ۲۰۰۲؛ موریرا ۲۰۰۲). بر این اساس، با افزایش دمای فرآیند، میزان جذب روغن نمونه‌ها به دلیل افزایش مقدار رطوبت خارج‌شده از محصول در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد. همچنین باید در نظر داشت که با افزایش دما، زمان مورد نیاز برای رسیدن به ویژگی‌های موردنظر مانند محتوای رطوبت کاهش می‌یابد (ترونکوزو و پدرسچی ۲۰۰۹) و از این رو می‌تواند منجر به کاهش جذب روغن گردد. شکل ۱-ب، محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی را بر

با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین این رابطه، معادله خط راستی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\ln(O_{eq}) = \ln(O_0) - (E_a/RT)$$

انرژی اکتیواسیون از طریق محاسبه شیب معادله خط راست، به دست آمد.

### ارزیابی حسی

به دلیل تعداد زیاد تیمارها (۲۱۶ تیمار)، ارزیابی حسی فقط برای نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه (۷۲ نمونه) انجام گردید. ۱۰ ارزیاب از میان دانشجویان کارشناسی ارشد رشته علوم و صنایع غذایی انتخاب شده و نمونه‌ها پس از اختصاص کد، جهت ارزیابی فاکتورهای موردنظر بر اساس تست هدونیک پنج نقطه‌ای بین ارزیاب‌ها پخش شدند. ویژگی‌های حسی بررسی‌شده در این ارزیابی شامل رنگ (زرد طلایی: بسیار مطلوب؛ رنگ تیره: بسیار نامطلوب) بافت (سفت: بسیار مطلوب؛ نرم: بسیار نامطلوب)، عطر و طعم (طعم روغنی بسیار ملایم: بسیار مطلوب؛ طعم روغنی بسیار شدید: بسیار نامطلوب)، شکل ظاهری (چروکیدگی پایین: بسیار مطلوب؛ چروکیدگی بالا: بسیار نامطلوب)، شدت بو (بوی روغنی ملایم: بسیار مطلوب؛ بوی روغنی شدید: بسیار نامطلوب) و ارزیابی کلی (بر اساس فاکتورهای ارزیابی‌شده) بود. در امتیازدهی به فاکتورهای ارزیابی‌شده نمره ۵ برای گزینه بسیار مطلوب و نمره ۱ برای گزینه بسیار نامطلوب در نظر گرفته شد.

### آنالیز آماری

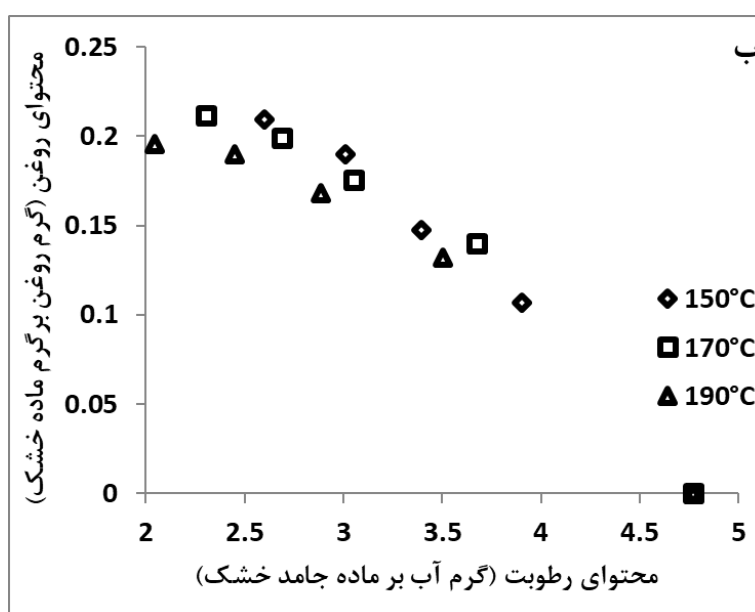
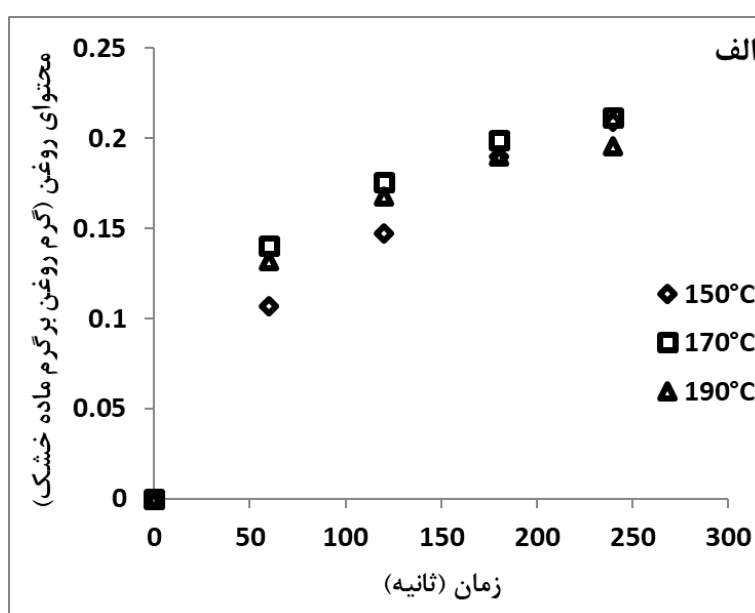
در این پژوهش، یک آزمایش به صورت فاکتوریل بر مبنای طرح کامل تصادفی پیاده شده و تأثیر هر کدام از تیمارها [(امواج اولتراسوند در سه سطح ۰ (کنترل)، ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز، امواج مایکروویو در سه سطح ۰ (کنترل)، ۳ و ۶ وات بر گرم، دمای سرخ‌کردن در سه سطح ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان سرخ‌کردن در چهار سطح ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در دو تکرار:  $2 \times 4 \times 3 \times 3 = 216$ ]] روی جذب روغن آنالیز گردید.

حسب محتوای رطوبت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل در مورد نمونه شاهد مشاهده می‌شود، برای رسیدن به محتوای رطوبت یکسان ۳ گرم آب بر گرم ماده خشک، میزان جذب روغن با افزایش هر ۲۰ درجه سلسیوس، حدود ۱ گرم روغن بر گرم ماده خشک کاهش می‌یابد.

جدول ۳- مقایسه میانگین محتوای رطوبت و جذب روغن در دماهای مختلف سرخ کردن

۱۹۰	۱۷۰	۱۵۰	دمای سرخ کردن (درجه سلسیوس)
۱/۴۳۶۳ <sup>a</sup>	۱/۴۶۶۶ <sup>a</sup>	۱/۵۶۴۳ <sup>a</sup>	محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)
۰/۱۳۰۴ <sup>a</sup>	۰/۱۳۲۵ <sup>a</sup>	۰/۱۱۶ <sup>b</sup>	محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک)

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



شکل ۱- نمودار جذب روغن قطعات سیب‌زمینی بر حسب زمان (الف) و محتوای رطوبت قطعات سیب‌زمینی (ب) در دماهای مختلف برای نمونه شاهد

مقایسه با نمونه شاهد به طور معنی‌داری کاهش داد؛ هرچند میزان روغن نمونه‌ها در زمان‌های طولانی‌تر (۳ و ۴ دقیقه) در مقایسه با همان زمان در نمونه‌های شاهد، بیشتر بود (شکل ۲- الف، ج و ه). با در نظر گرفتن این واقعیت که به‌کاربردن پیش‌تیمار فراصوت، باعث تغییرات ساختاری و ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در سیب‌زمینی و افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت می‌شود، از این‌رو می‌توان کاهش جذب روغن در زمان‌های ابتدایی فرآیند را به بالابودن فشار بخار در داخل ماده غذایی نسبت داد که از ورود روغن به درون سیب‌زمینی جلوگیری می‌کند. با این حال، با ادامه فرآیند و در زمان‌های انتهایی آن به‌دلیل خروج رطوبت و افت فشار بخار داخل و از طرفی با مهیاشدن کانال‌های بیشتر برای ورود روغن، محتوای روغن نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این امر به خصوص در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس (شکل ۲- ه) که رطوبت خروجی بیشتر است، دیده می‌شود. علاوه بر این، احتمالاً پیش‌تیمار فراصوت موجب خروج قسمتی از مواد جامد سیب‌زمینی گردیده و این امر باعث افزایش رطوبت محصول شده باشد. بنابراین، ممکن است مقداری از افزایش جذب روغن در زمان‌های انتهایی فرآیند سرخ‌کردن مرتبط با این موضوع باشد. آزمایش‌های تکمیلی برای اثبات این مسئله مورد نیاز است. در استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، نقطه دیگری که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، اثر آن روی خروج رطوبت است که باعث خروج سریع‌تر رطوبت از قطعات سیب‌زمینی می‌گردد و این امر به ایجاد سریع‌تر ویژگی‌های مطلوب در ماده غذایی منجر می‌گردد و در نتیجه زمان مورد نیاز فرآیند کاهش می‌یابد؛ از این‌رو می‌تواند جذب روغن را طی فرآیند کاهش دهد. در مقایسه قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با فراصوت در فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز مشاهده می‌شود که میزان جذب روغن در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز پایین‌تر است؛ هرچند این اختلاف معنی‌دار نیست.

جدول ۴، مقایسه میانگین جذب روغن را در زمان‌های مختلف سرخ‌کردن نشان می‌دهد. جذب روغن با افزایش زمان به طور معنی‌داری افزایش یافت. جذب روغن طی فرآیند سرخ‌کردن به‌دلیل هم‌زمانی آن با کاهش رطوبت ماده غذایی و تغییرات ساختاری یک پدیده پیچیده است. پدیده جذب روغن، عمدتاً هنگام خارج‌کردن ماده غذایی از روغن و هنگام سردشدن محصول رخ می‌دهد (گارایو و موریرا ۲۰۰۲). در این پژوهش، با افزایش زمان سرخ‌کردن، محتوای روغن برای همه تیمارها در دماها و پیش‌تیمارهای مختلف افزایش یافت (شکل ۲ الف تا و). در مورد همه نمونه‌ها، محتوای روغن به صورت نمایی افزایش یافت و با افزایش زمان، آهنگ جذب روغن تقلیل پیدا کرد. به عنوان مثال، در مورد نمونه شاهد، قسمت اعظم روغن جذب‌شده (حدود ۶۰٪) در همان لحظات اولیه سرخ‌کردن (۱ دقیقه اول)، صورت می‌گیرد (شکل ۲، الف، ج و ه). کاهش آهنگ جذب روغن با افزایش زمان سرخ‌کردن را می‌توان به تغییرات ساختاری مانند ژلاتینه‌شدن نشاسته و تغییراتی که در ساختار حفره‌های پوسته رخ می‌دهند و منجر به کاهش تخلخل پوسته و ایجاد یک پوسته فشرده می‌شود، نسبت داد (پینتهوس و همکاران ۱۹۹۵؛ کاساما و انگادی ۲۰۰۵). از طرفی، با گذشت زمان، رطوبت سطحی ماده غذایی کاهش می‌یابد و با توجه به این که در ابتدای فرآیند، محتوای رطوبت نمونه‌ها و سرعت خروج رطوبت بالاست، به‌دلیل خروج رطوبت، تخلخل افزایش یافته و جذب روغن بیشتر می‌گردد. با گذشت زمان و کاهش رطوبت ماده غذایی، سرعت خروج رطوبت و به تبع آن ایجاد تخلخل در ماده غذایی کاهش یافته و این امر باعث کاهش سرعت جذب روغن در ادامه فرآیند می‌گردد (شاهین و سومنو ۲۰۰۹، سورگی و همکاران ۲۰۱۰).

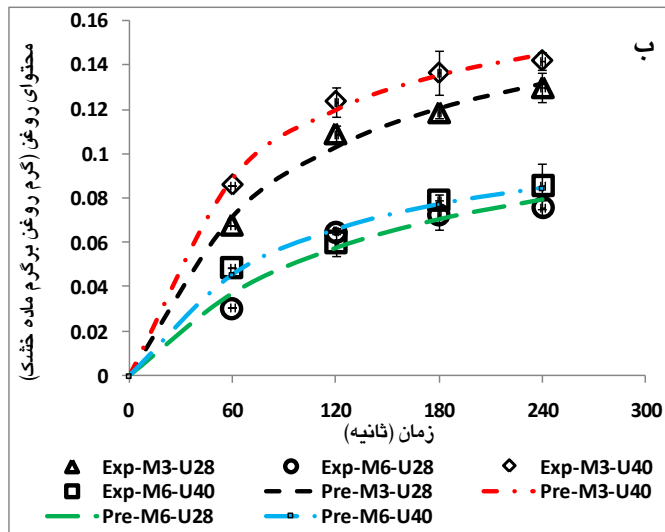
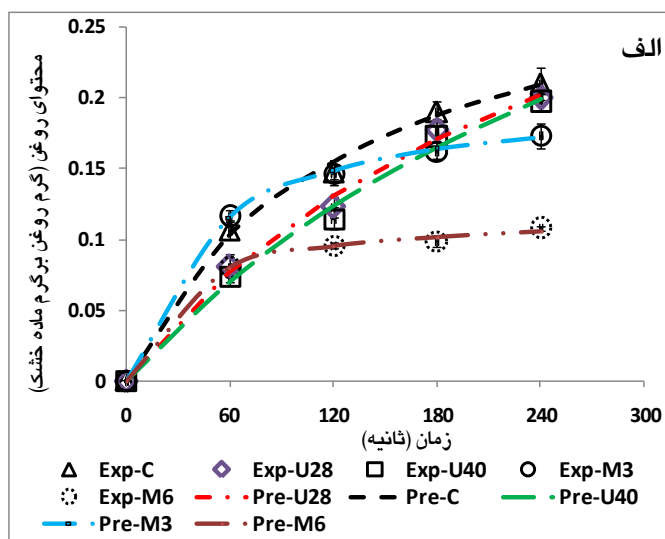
جدول ۵، مقایسه میانگین جذب روغن در پیش‌تیمار فراصوت طی فرآیند سرخ‌کردن را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از جدول ۵، پیش‌تیمار فراصوت با هر دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز، روغن جذب‌شده را در

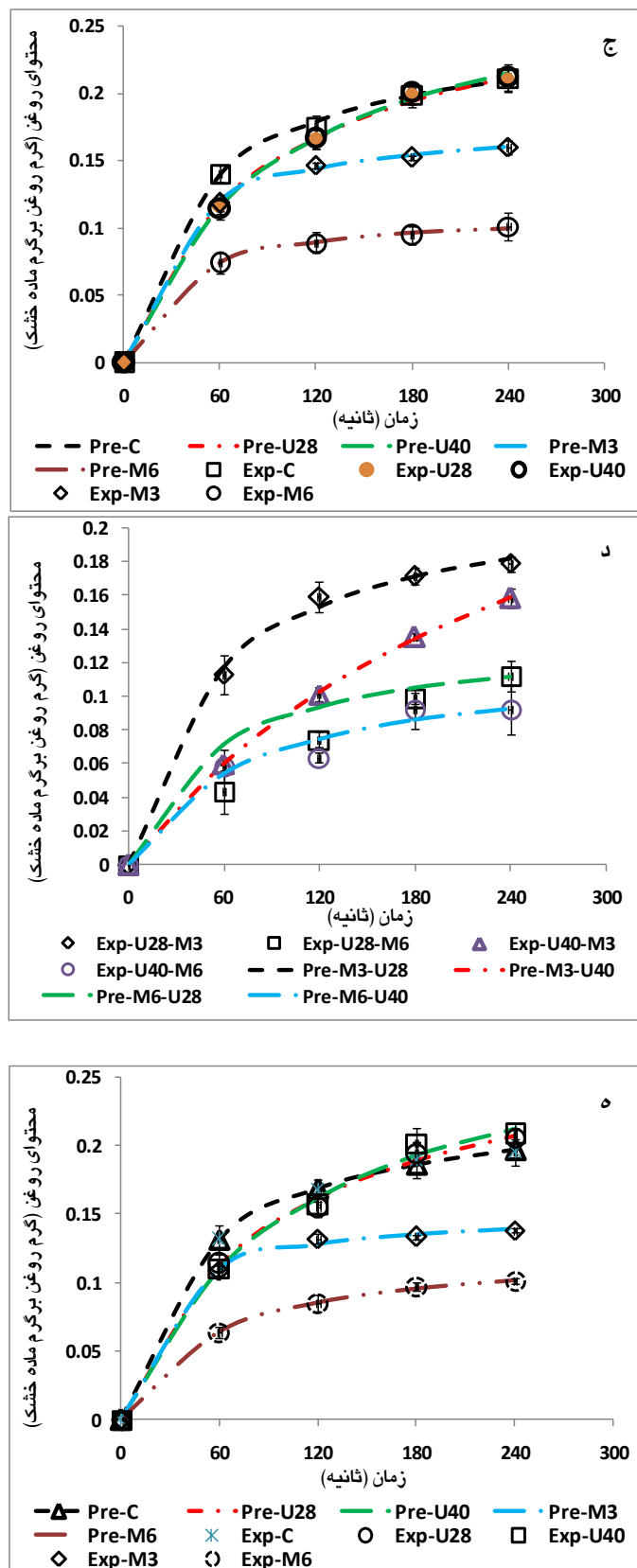


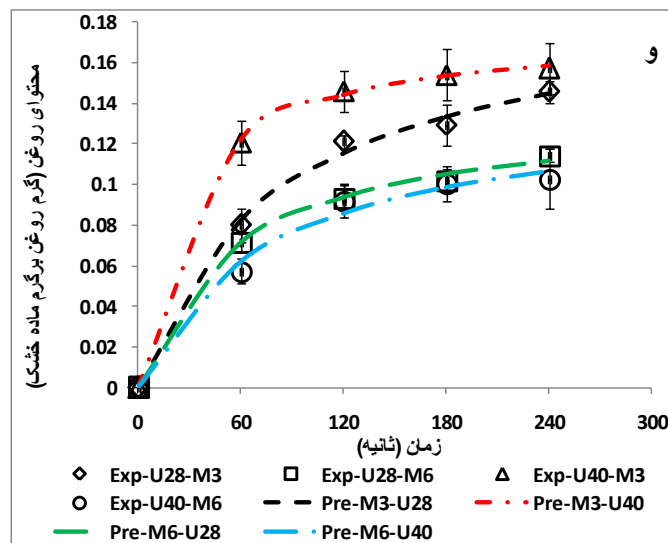
جدول ۴- مقایسه میانگین محتوای رطوبت و جذب روغن در زمان‌های مختلف سرخ کردن

زمان سرخ کردن (دقیقه)	۱	۲	۳	۴
محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)	۱/۸۶۳ <sup>۵a</sup>	۱/۵۹۷ <sup>۴b</sup>	۱/۳۵۸ <sup>۹c</sup>	۱/۱۳۶ <sup>۳d</sup>
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک)	۰/۰۸۸ <sup>۵d</sup>	۰/۱۲۱ <sup>۳c</sup>	۰/۱۴۲ <sup>۷b</sup>	۰/۱۵۲ <sup>۷a</sup>

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







شکل ۲- نمودارهای جذب روغن قطعات سیب زمینی بر اساس داده‌های آزمایشی (Exp) و داده‌های حاصل از برازش (Pre) در شرایط مختلف آزمایشی با مدل ۱ جدول ۲ در دماهای ۱۵۰ (الف، ب)، ۱۷۰ (ج، د) و ۱۹۰ (ه، و) درجه سلسیوس

جدول ۵- مقایسه میانگین محتوای رطوبت و جذب روغن در فرکانس‌های مختلف پیش تیمار فراصوت در فرآیند سرخ کردن

فرکانس فراصوت (کیلوهرتز)		
۴۰	۲۸	۰
۱/۳۵۴۷ <sup>b</sup>	۱/۴۵۸۱ <sup>b</sup>	۱/۶۵۴۳ <sup>a</sup>
محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)		
۰/۱۲۱۹ <sup>b</sup>	۰/۱۲۲۶ <sup>b</sup>	۰/۱۲۴۵ <sup>a</sup>
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک)		

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

نشان می‌دهد. اعمال پیش تیمار مایکروویو نیز به طور معنی داری جذب روغن را کاهش داد. این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش‌های مشابه مطابقت دارد (سانگ و همکاران ۲۰۰۷؛ انگادی و همکاران ۲۰۰۹؛ و ادجی و همکاران ۲۰۰۹). پیش تیمار مایکروویو با توان ۳ و ۶ وات بر گرم به ترتیب ۲۰ و ۳۱ درصد جذب روغن را در مقایسه با نمونه شاهد کاهش دادند. کاهش جذب روغن در اثر اعمال پیش تیمار مایکروویو را می‌توان به کاهش محتوای رطوبت (جدول ۶) و تغییرات ساختاری سیب زمینی و همچنین، اصلاح توزیع رطوبت در ماده غذایی نسبت داد (انگادی و همکاران ۲۰۰۹؛ و ادجی و همکاران ۲۰۰۹). علاوه بر موارد ذکر شده، اعمال این پیش تیمار به دلیل ژلاتینه کردن نشاسته سطحی و تشکیل دادن پوسته‌ای که مانند مانعی در برابر ورود روغن به داخل ماده غذایی عمل می‌کند و کاهش حجم نمونه‌ها که در اثر

طبق نتایج، اثر متقابل فاکتورهای دما، زمان و فراصوت در زمان‌های ابتدایی فرآیند روی جذب روغن معنی دار بود (داده‌ها نشان داده نشده است). این نتایج نشان داد که در دقیقه اول سرخ کردن در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس، پیش تیمار فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، ۵۰٪ و در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس، ۴۳٪ در مقایسه با نمونه شاهد، جذب روغن را کاهش داد. اما با توجه به افزایش سرعت جذب روغن با گذشت زمان، اختلاف محتوای روغن بین نمونه‌های شاهد و پیش تیمار شده کاهش یافت و حتی در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس در زمان‌های انتهایی فرآیند، میزان جذب روغن در نمونه‌های پیش تیمار شده به بالاتر از نمونه شاهد رسید ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی دار نبود (شکل ۲- الف، ج و ه).

جدول ۶، مقایسه میانگین جذب روغن در توان‌های مختلف پیش تیمار مایکروویو طی فرآیند سرخ کردن را

کیلوهرتز) را نشان می‌دهد. پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم نسبت به پیش‌تیمار ۳ وات بر گرم به میزان بیشتری جذب روغن را کاهش داد. علاوه بر کاهش

اعمال پیش‌تیمار ایجاد می‌شود، نیز در کاهش جذب روغن مؤثر می‌باشد (ترونکوزو و پدرسچی ۲۰۰۹). شکل ۲ (الف، ج و ه)، محتوای روغن نمونه‌های شاهد، پیش‌تیمار شده با مایکروویو (۳ وات بر گرم و ۶ وات بر گرم) و پیش‌تیمار شده با فراصوت (۲۸ کیلوهرتز و ۴۰

جدول ۶- مقایسه میانگین محتوای رطوبت و جذب روغن در توان‌های مختلف پیش‌تیمار مایکروویو در فرآیند سرخ‌کردن

توان مایکروویو (وات بر گرم)		
۶	۳	۰
۰/۳۱۳۹ <sup>c</sup>	۱/۲۹۸ <sup>b</sup>	۲/۸۵۵۱ <sup>a</sup>
محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)		
۰/۰۸۳ <sup>c</sup>	۰/۱۳۱۵ <sup>b</sup>	۰/۱۶۴۴ <sup>a</sup>
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک)		

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

شکل ۲ (ب، د، و)، میزان جذب روغن نمونه‌های پیش-تیمار شده را به صورت تلفیقی (فراصوت و مایکروویو) نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده برای نمونه‌هایی که تحت هر دو پیش‌تیمار فراصوت و مایکروویو قرار گرفتند، نشان می‌دهد که اعمال این دو پیش‌تیمار بر روی قطعات سیب‌زمینی در مقایسه با نمونه شاهد، جذب روغن را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد ( $P < 0/05$ ). همچنین نتایج، بیانگر این است که با افزایش فرکانس فراصوت و توان مایکروویو، محتوای روغن نمونه‌ها به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با توجه به شکل ۱- ج، قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ دقیقه با محتوای روغن ۰/۲۱ گرم روغن بر گرم ماده خشک که بیشترین محتوای روغن را در بین نمونه‌های مختلف داشتند، مشاهده می‌شود زمانی که نمونه‌ها تحت پیش‌تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز و سپس پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم قرار گرفتند، به میزان ۰/۱۷۹ گرم روغن بر گرم ماده خشک، روغن جذب کردند؛ در حالی که، اعمال پیش‌تیمار فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم، جذب روغن را تا ۰/۰۹۷ گرم روغن بر گرم ماده خشک کاهش داد.

محتوای رطوبت اولیه، علتی که برای کاهش جذب روغن در توان ۶ وات بر گرم نسبت به توان ۳ وات بر گرم در قطعات سیب‌زمینی می‌توان ذکر کرد، کاهش حجم قطعات (چروکیدگی) و تشکیل پوسته ضخیم‌تر می‌باشد (انگادی و همکاران ۲۰۰۹؛ دهقان نیا و همکاران ۱۳۹۴). بررسی وجود پوسته ضخیم‌تر نیاز به ارزیابی‌های تکمیلی مانند تصویربرداری میکروسکوپی و همچنین، ارزیابی دستگاهی بافت محصول دارد.

در رابطه با اثر متقابل سه فاکتور دما، زمان و توان مایکروویو بر روی جذب روغن (داده‌ها نشان داده نشده است) لازم به ذکر است که اختلاف در توان‌های یکسان پیش‌تیمار مایکروویو بین دماها و زمان‌های مختلف معنی‌دار نبود؛ ولی با افزایش توان مایکروویو، جذب روغن به طور معنی‌داری کاهش یافت. به عنوان مثال، در نمونه سرخ‌شده در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ دقیقه که با جذب ۰/۲۱ گرم روغن بر گرم ماده خشک بیشترین میزان جذب روغن را در بین نمونه‌های مختلف داشت، اعمال پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم ۳۰٪ و توان ۶ وات بر گرم بیش از ۵۰٪ جذب روغن را در مقایسه با نمونه شاهد کاهش دادند (شکل ۲- الف، ج و ه).

جدول ۷- داده‌های آماری حاصل برای مدل‌های ۱-۶ جدول ۲ در دماها و تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

دما (°C)						مدل ۱
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		تیمار
RMSE ( $\times 10^{-4}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-4}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-4}$ )	R <sup>2</sup>	
۱/۹۲	۰/۹۹	۲/۴۴	۰/۹۹	۵/۳۱	۰/۹۹	Control
۲/۶۸	۰/۹۹	۲/۰۳	۰/۹۹	۱/۲۸	۰/۹۹	U28
۱/۰۳	۰/۹۹	۱/۱۱	۰/۹۹	۲/۶۳	۰/۹۹	U40
۵/۳۳	۰/۹۹	۲/۸۱	۰/۹۹	۶/۲۲	۰/۹۹	M3
۶/۶	۰/۹۹	۳/۱۴	۰/۹۹	۶/۹۶	۱	M6
۴/۲۶	۰/۹۹	۴/۳۸	۰/۹۹	۴/۴۵	۰/۹۹	U28 – M3
۲/۲۷	۰/۹۹	۲/۲۷	۰/۹۹	۶/۱۴	۰/۹۷	U28 – M6
۱/۵۵	۰/۹۹	۱	۰/۹۹	۳/۲۹	۰/۹۹	U40 – M3
۴/۹۶	۰/۹۹	۷/۹۶	۰/۹۶	۳/۹۴	۰/۹۸	U40 – M6

دما (°C)						مدل ۲
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		تیمار
RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	
۳/۸۴	۰/۹۹	۶/۱	۰/۹۹	۶/۷۲	۰/۹۹	Control
۶/۴۳	۰/۹۹	۲/۷۲	۰/۹۹	۶/۳۳	۰/۹۹	U28
۶/۴۹	۰/۹۹	۲/۴۸	۰/۹۹	۶/۹۸	۰/۹۹	U40
۱/۶۷	۰/۹۹	۲/۴۸	۰/۹۹	۴/۴۲	۰/۹۹	M3
۴/۱۱	۰/۹۹	۱/۷۶	۰/۹۹	۳/۳۸	۰/۹۹	M6
۱/۴	۰/۹۹	۱/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۸۳	۰/۹۹	U28 – M3
۱/۵۷	۰/۹۹	۲/۷۲	۰/۹۹	۳/۴۸	۰/۹۹	U28 – M6
۳/۹۱	۰/۹۹	۱/۲۸	۰/۹۹	۵/۴۶	۰/۹۷	U40 – M3
۳/۳۸	۰/۹۹	۸/۶۷	۰/۹۶	۴/۷۴	۰/۹۸	U40 – M6

دما (°C)						مدل ۳
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰		تیمار
RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	
۴/۸۴	۰/۹۹	۲/۳۱	۰/۹۹	۴/۱۹	۰/۹۹	Control
۶/۰۴	۰/۹۹	۶/۵۸	۰/۹۹	۶/۳	۰/۹۹	U28
۸/۶۳	۰/۹۹	۷/۱۲	۰/۹۹	۶/۹۹	۰/۹۹	U40
۴/۳۸	۰/۹۹	۴/۱۶	۰/۹۹	۲/۲۳	۰/۹۹	M3
۶/۲۲	۰/۹۹	۸/۰۹	۰/۹۹	۶/۹۸	۰/۹۸	M6
۴/۰۹	۰/۹۹	۲/۸۲	۰/۹۹	۶/۴۱	۰/۹۹	U28 – M3
۲/۸	۰/۹۹	۱/۳	۰/۹۹	۲/۲۳	۰/۹۹	U28 – M6
۱/۸۱	۰/۹۹	۳/۳۸	۰/۹۹	۷/۷۶	۰/۹۵	U40 – M3
۷/۳۱	۰/۹۷	۷/۱۳	۰/۹۷	۲/۸۷	۰/۹۹	U40 – M6

دما (°C)						مدل ۴	تیمار
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰			
RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>		
۴/۶	۰/۹۹	۷/۴	۰/۹۹	۸/۱	۰/۹۹		Control
۷/۸	۰/۹۹	۳/۲	۰/۹۹	۷/۷	۰/۹۹		U28
۷/۹	۰/۹۹	۳/۰	۰/۹۹	۸/۵	۰/۹۹		U40
۲/۰	۰/۹۹	۴/۰	۰/۹۹	۵/۴	۰/۹۹		M3
۵/۰	۰/۹۹	۲/۱	۰/۹۹	۴/۱	۰/۹۹		M6
۱/۷	۰/۹۹	۱/۲	۰/۹۹	۱/۱	۰/۹۹		U28 – M3
۱/۹	۰/۹۹	۳/۳	۰/۹۹	۴/۲	۰/۹۹		U28 – M6
۴/۷	۰/۹۹	۱/۵	۰/۹۹	۶/۵	۰/۹۷		U40 – M3
۴/۱	۰/۹۹	۱۰/۵	۰/۹۶	۵/۷	۰/۹۸		U40 – M6

دما (°C)						مدل ۵	تیمار
۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰			
RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>	RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	R <sup>2</sup>		
۳/۴۶	۰/۹۹	۳/۶۴	۰/۹۹	۵/۳۸	۰/۹۹		Control
۵/۵۴	۰/۹۹	۳/۴	۰/۹۹	۶/۲۳	۰/۹۹		U28
۶/۷۹	۰/۹۹	۳/۶۶	۰/۹۹	۶/۹۵	۰/۹۹		U40
۴/۴	۰/۹۹	۳/۷۷	۰/۹۹	۲/۶۹	۰/۹۹		M3
۴/۵	۰/۹۹	۵/۰۱	۰/۹۹	۵/۹۸	۰/۹۹		M6
۳/۸۲	۰/۹۹	۱/۲۲	۰/۹۹	۳/۷۳	۰/۹۹		U28 – M3
۱/۵۹	۰/۹۹	۲/۲	۰/۹۹	۳/۱۳	۰/۹۹		U28 – M6
۲/۶۱	۰/۹۹	۱/۸۲	۰/۹۹	۶/۷۳	۰/۹۶		U40 – M3
۶/۱	۰/۹۸	۸/۱۸	۰/۹۶	۴/۴۶	۰/۹۸		U40 – M6

جدول ۸- مدل‌های چندمتغیره برای ثابت‌های مدل‌های جدول ۷ بر حسب شرایط فرآیند\*

مدل	شماره	R <sup>2</sup>
$a = 0.0018U - 0.0315M + 0.016T$	۱	٪۹۱
$b = -0.0002U + 0.0011M + 0.0001T$		٪۸۴
$a = 0.0012U + 0.0007M - 0.0206T$	۲	٪۹۵
$b = 0.0001U - 0.0002M + 0.0005T$		٪۹۱
$a = 0.0007U - 0.0006M - 0.0083T$	۳	٪۹۷
$b = 0.0017U + 0.0005M - 0.0102T$		٪۸۸
$a = -0.0012U - 0.0007M + 0.0207T$	۴	٪۹۵
$b = 0.0006U - 0.0121M + 0.024T$		٪۹۱
$c = 0.0012U + 0.0007M - 0.0208T$		٪۹۵
$a = 0.0196U - 0.0156M + 0.07895T$	۵	٪۹۶
$b = 0.9627U + 7.241M + 36.288T$		٪۸۲

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

جدول ۹- ضرایب مدل مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶) در شرایط مختلف سرخ‌کردن

تیمار	دما (°C)					
	۱۹۰		۱۷۰		۱۵۰	
	b ( $\times 10^{-2}$ )	a	b ( $\times 10^{-2}$ )	a	b ( $\times 10^{-2}$ )	a
Control	۲/۱۱	۰/۲۳۶	۱/۹۹	۰/۲۵۳	۰/۷۷۵	۰/۳۲۱
U28	۱/۰۳	۰/۲۹۱	۱/۱۲	۰/۲۹	۰/۳۴۴	۰/۴۴۶
U40	۰/۹۱۵	۰/۳۱	۱/۰۲	۰/۳۰۲	۰/۲۵۵	۰/۵۲۳
M3	۴/۳۴	۰/۱۵۲	۳/۲۴	۰/۱۸	۲/۱۲	۰/۲۰۵
M6	۱/۶۷	۰/۱۲۸	۳/۱۲	۰/۱۱۳	۳/۱۹	۰/۱۲۱
U28M3	۱/۲۳	۰/۱۹۳	۱/۸۲	۰/۲۲۳	۱/۰۷	۰/۱۸۲
U28M6	۲/۳	۰/۲۳۷	۲/۱۳	۰/۲۱	۰/۶۸	۰/۱۲۸
U40M3	۳/۶۷	۰/۱۷۶	۰/۳۳۵	۰/۳۵۷	۱/۵۶	۰/۱۸۳
U40M6	۱/۳	۰/۱۴	۱/۲۷	۰/۱۲۳	۱/۰۴	۰/۱۱۸

## مدلسازی

در جدول ۷، نتایج برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های مختلف جدول ۲، ارائه شده است. طبق نتایج، همه مدل‌های جدول ۲ به خوبی قادر به برازش داده‌های آزمایشی بودند ولی در میان این مدل‌ها، مدل ۵ (یکی از مدل‌های پیشنهادی این پژوهش) با دقت بیشتری محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی را پیش‌بینی کرد. مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶)، مدلسازی جذب روغن قطعات سیب‌زمینی تازه و پیش‌تیمار شده با آنزیم‌بری و خشک‌کردن را با استفاده از مدل‌های ۱ و ۲ انجام دادند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که این دو مدل به خوبی (به ترتیب با  $R^2=0/9793$  و  $R^2=0/9786$ ) داده‌های آزمایشی حاصل را برازش می‌کنند. علاوه بر این مورد، کروکید و همکاران (۲۰۰۰) از مدل ۲، ترونکوزو و پدرسچی (۲۰۰۹) از مدل ۱ و دهقان‌نصیری و همکاران (۲۰۱۱) از مدل ۲ جدول ۲، جهت مدلسازی استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشی این پژوهش با نتایج پژوهش‌های فوق مطابقت دارد (جدول ۷).

در جدول ۸، مدل‌های چندمتغیره برای ثابت‌های مدل‌های جدول ۲ بر اساس شرایط فرآیند (دما، توان مایکروویو و فرکانس فراصوت) آورده شده است. همچنین، جدول ۹، مقدار ضرایب مدل مویانو و پدرسچی را برای تیمارهای

مختلف نشان می‌دهد. ثابت سرعت جذب روغن (b) با دامنه  $s^{-1} -0/0434 - 0/00255$  برای نمونه‌های مختلف به دست آمد. مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶) دامنه  $s^{-1} -0/05857$  را برای این ضریب در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده در دامنه دمایی ۱۸۰-۱۲۰ درجه سلسیوس گزارش کرده‌اند. طبق نتایج جدول ۹، مقدار ضریب جذب روغن با افزایش دما افزایش یافت. همچنین، اعمال پیش-تیمار مایکروویو، باعث افزایش مقدار این ضریب شد؛ این در حالی است که پیش‌تیمار فراصوت مقدار این ضریب را کاهش داد. در مورد محتوای روغن تعادلی (a) نمونه‌ها، نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که افزایش دما با کاهش این ضریب همراه بود؛ همین‌طور در نمونه‌هایی که پیش‌تیمار مایکروویو بر روی آن‌ها اعمال شد، محتوای روغن تعادلی کاهش یافت ولی پیش‌تیمار فراصوت این ضریب را افزایش داد.

شکل ۳،  $\ln(O_{eq})$  را به صورت تابعی از  $1/T$ ، برای تیمارهای مختلف مطالعه شده در این پژوهش نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ و جدول ۹، ملاحظه می‌شود که محتوای روغن تعادلی نمونه‌های شاهد، U28، U40 و M3 (مطابق جدول ۱)، با افزایش دما افزایش ولی در مورد بقیه نمونه‌ها کاهش یافته است.

## انرژی فعال‌سازی

جدول ۱۰، مقدار انرژی فعال‌سازی، ضریب پیش‌نمایی  $(O_{eq})$  و  $R^2$  به‌دست‌آمده از مدل آرنیوس را برای تیمارهای مطالعه‌شده نشان می‌دهد. مقدار انرژی فعال‌سازی برای نمونه شاهد ۱۲/۵۷ کیلوژول بر مول بود. در تطابق با نتایج حاصل از این پژوهش، مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶)، مقدار انرژی فعال‌سازی را برای نمونه شاهد ۱۰/۲۳- کیلوژول بر مول گزارش کردند. طبق نتایج جدول ۱۰، در بین نمونه‌هایی که مدل آرنیوس با  $R^2$  بالای ۷۰٪ داده‌های آزمایشی را برازش نمود، محتوای روغن تعادلی نمونه‌های U40 - M6 با انرژی فعال‌سازی ۶/۹۸- کیلوژول بر مول، کمترین حساسیت به تغییرات دما را داشت و نمونه‌های U40 (علایم اختصاری طبق جدول ۱) با انرژی فعال‌سازی ۲۱/۶۲ کیلوژول بر مول، حساسترین نمونه به تغییرات دما بود (مویانو و پدرسچی، ۲۰۰۶). منفی‌بودن انرژی فعال‌سازی در برخی از نمونه‌ها نشان می‌دهد که جذب روغن با افزایش دما در تیمارهای مختلف کاهش یافته است.

## ارزیابی حسی

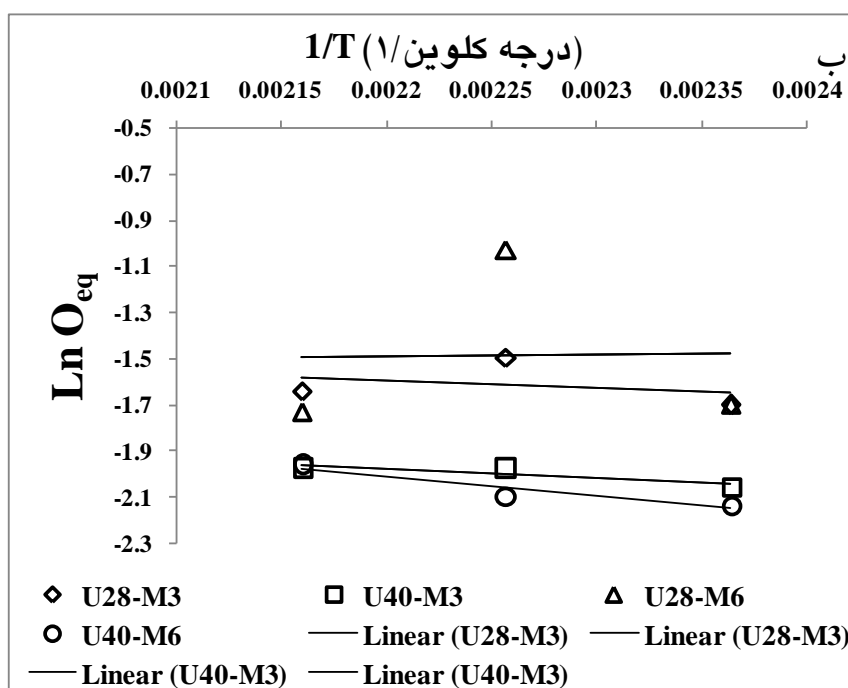
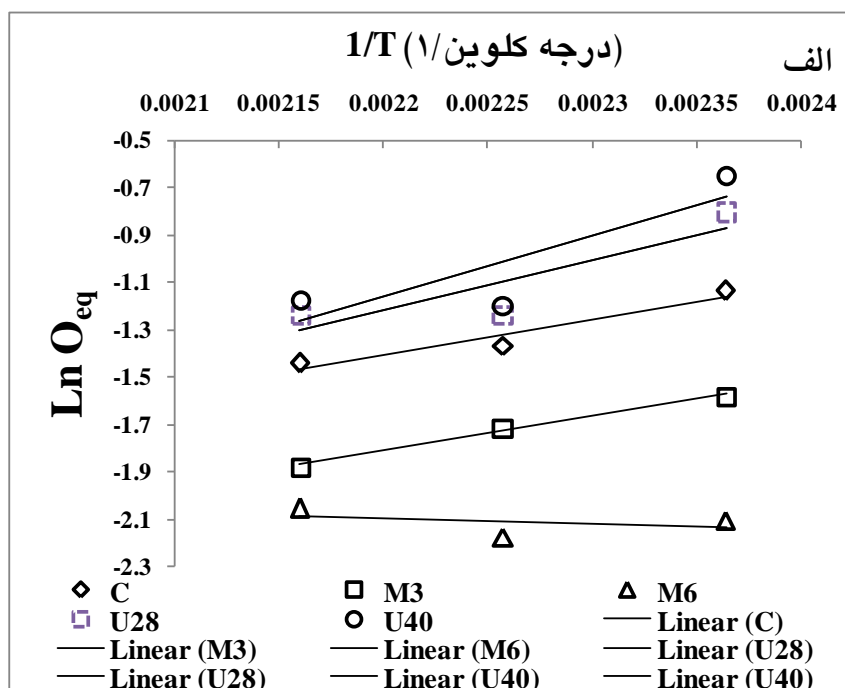
نتایج ارزیابی حسی نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه در جدول ۱۱ آورده شده است. در رابطه با فاکتور رنگ در نمونه‌های شاهد، نتایج نشان داد که با افزایش زمان فرآیند، رنگ محصول مطلوب‌تر می‌شود. همچنین، اعمال پیش‌تیمار مایکروویو در زمان‌های پایین فرآیند، موجب ایجاد رنگ مطلوب در نمونه‌ها شد و در زمان‌های طولانی‌تر فرآیند، رنگ محصول تیره‌تر گردید.

در رابطه با شکل ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده نیز نتایج حاصل نشان داد که با افزایش زمان از کیفیت شکل

ظاهری محصول به طور معنی‌داری کاسته می‌شود. این امر را می‌توان به خروج بیشتر رطوبت از محصول و در نتیجه کاهش بیشتر حجم نمونه‌ها در زمان‌های طولانی‌تر فرآیند نسبت داد. اعمال پیش‌تیمار مایکروویو با توجه به ایجاد چروکیدگی زیاد در نمونه‌ها، باعث افت کیفیت ظاهری شد. در مقابل، اعمال پیش‌تیمار فراصوت با توجه به ایجاد کانال‌های میکروسکوپی و تسهیل خروج رطوبت از نمونه‌ها، بافت متخلخل‌تری ایجاد کرد و موجب کاهش چروکیدگی نمونه‌ها گردید و به طور معنی‌داری با دریافت امتیاز بالاتری برای این نمونه‌ها همراه بود.

در حالت کلی، بافت محصول نیز با افزایش زمان فرآیند بهبود یافت که می‌توان آن را به خروج بیشتر رطوبت و ایجاد سفتی مطلوب در نمونه‌ها در زمان‌های طولانی‌تر فرآیند نسبت داد. در رابطه با نمونه‌های پیش‌تیمار شده با مایکروویو نتایج نشان داد که در زمان‌های پایین‌تر فرآیند با توجه به محتوای رطوبت پایین و سفت‌تر بودن این نمونه‌ها، بافت بهبود می‌یابد. در نمونه‌هایی که به مدت ۴ دقیقه سرخ شدند، به دلیل محتوای رطوبت بسیار پایین و ایجاد بافت متخلخل در قسمت مغزی، بافت نامطلوبی نسبت به نمونه شاهد به‌دست آمد. پیش‌تیمار فراصوت در زمان‌های پایین فرآیند به دلیل محتوای رطوبت بالا و بافت نرم نمونه‌ها، تأثیر معنی‌داری روی بافت نداشت. در زمان‌های طولانی‌تر، به دلیل خروج بیشتر رطوبت از نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد، بافت این نمونه‌ها بهبود پیدا کرد؛ به طوری که نمونه پیش‌تیمار شده با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز فراصوت و سرخ‌شده به مدت ۴ دقیقه به عنوان بهترین نمونه از نظر ارزیاب‌ها انتخاب گردید.





شکل ۳- Ln (O<sub>eq</sub>) در برابر 1/T برای تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

جدول ۱۰- انرژی فعال‌سازی حاصل از مدل آرنیوس بر

اساس جدول ۱

تیما	O <sub>0</sub>	E <sub>a</sub> (kJ/mol)	R <sup>2</sup>
Control	۰/۰۱	۱۲/۵۷	۰/۹۲
M3	۰/۰۱	۱۲/۰۹	۰/۹۹
M6	۰/۲۱	-۱/۹۶	۰/۱۵
U28	۰/۰۰	۱۷/۶	۰/۷۶
U40	۰/۰۰	۲۱/۶۲	۰/۷۳
U28 – M3	۰/۴۱	-۲/۶۸	۰/۱۰
U40 – M3	۰/۳۲	-۳/۱۸	۰/۷۷
U28 – M6	۰/۱۹	۰/۵۸	۰/۰۰
U40 – M6	۰/۸۵	-۶/۹۸	۰/۹۰

محصول، طعم مطلوب در نمونه‌ها توسعه پیدا می‌کند. همچنین، اختلاف معنی‌داری بین بوی نمونه‌های سرخ-شده در زمان‌های مختلف فرآیند نیز مشاهده نگردید؛ هر چند نمونه‌های سرخ‌شده به مدت ۳ دقیقه امتیاز بالاتری داشتند ولی این اختلاف معنی‌دار نبود.

در رابطه با ارزیابی کلی نمونه‌ها نیز، کیفیت نمونه‌ها با افزایش زمان فرآیند بهبود یافت. در این ارتباط، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فراصوت، امتیازات بالاتری دریافت کردند؛ به طوری‌که نمونه پیش‌تیمارشده با فراصوت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و سرخ‌شده به مدت ۴ دقیقه، بهترین نمونه انتخاب شد. همچنین، نمونه‌هایی که تحت پیش‌تیمار مایکروویو قرار گرفتند، به طور معنی‌داری امتیاز پایین‌تری را در ارزیابی کلی نسبت به سایر نمونه‌ها به خود اختصاص دادند. این امر را می‌توان به کاهش حجم زیاد و چروکیدگی بالاتر، بافت نامناسب و همچنین رنگ تیره‌تر نمونه‌ها در اثر پیش-تیمار مایکروویو نسبت داد.

در مورد طعم نمونه‌ها نیز نتایج نشان داد که با افزایش زمان فرآیند، این ویژگی بهبود می‌یابد ولی در زمان‌های ۳ و ۴ دقیقه، اختلاف معنی‌داری بین نمونه‌های سرخ‌شده در زمان ثابت مشاهده نشد. این اثر را می‌توان به کافی-نبودن پخت در زمان‌های ابتدایی فرآیند نسبت داد که با ادامه فرآیند و در زمان‌های طولانی‌تر و پخت کامل

جدول ۱۱- نتایج ارزیابی حسی نمونه‌های مختلف (بر اساس جدول ۱) سرخ‌شده در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان‌های مختلف

زمان (دقیقه)	تیما	فاکتورهای بررسی‌شده در ارزیابی حسی				
		رنگ	شکل ظاهری	بافت	طعم	بو
۱	Control	۴/۲۵ <sup>j</sup>	۴/۸۰ <sup>c</sup>	۲/۰۰ <sup>q</sup>	۲/۳۵ <sup>k</sup>	۴/۳۵ <sup>a</sup>
۱	M3	۴/۳۰ <sup>i</sup>	۴/۷۰ <sup>f</sup>	۲/۴۰ <sup>opq</sup>	۳/۲۰ <sup>ghi</sup>	۴/۴۰ <sup>a</sup>
۱	M6	۴/۶۰ <sup>d</sup>	۳/۲۰ <sup>t</sup>	۲/۶۰ <sup>mno</sup>	۳/۱۰ <sup>hij</sup>	۴/۴۰ <sup>a</sup>
۱	U28	۴/۲۵ <sup>j</sup>	۴/۸۵ <sup>b</sup>	۲/۱۵ <sup>pq</sup>	۲/۳۵ <sup>k</sup>	۴/۳۵ <sup>a</sup>
۱	U40	۴/۲۰ <sup>k</sup>	۴/۸۵ <sup>b</sup>	۲/۰۵ <sup>q</sup>	۲/۳۵ <sup>k</sup>	۴/۳۰ <sup>a</sup>
۱	U28-M3	۴/۴۰ <sup>g</sup>	۴/۹۰ <sup>a</sup>	۲/۳۰ <sup>opq</sup>	۳/۳۰ <sup>fgh</sup>	۴/۳۵ <sup>a</sup>
۱	U40-M3	۴/۳۳ <sup>h</sup>	۴/۷۸ <sup>d</sup>	۲/۴۷ <sup>op</sup>	۳/۲۰ <sup>ghi</sup>	۴/۴۵ <sup>a</sup>
۱	U28-M6	۴/۵۰ <sup>f</sup>	۳/۳۰ <sup>s</sup>	۲/۷۰ <sup>lmno</sup>	۳/۲۵ <sup>fgh</sup>	۴/۴۵ <sup>a</sup>
۱	U40-M6	۴/۴۰ <sup>g</sup>	۳/۳۰ <sup>s</sup>	۲/۶۰ <sup>mno</sup>	۳/۳ <sup>fgh</sup>	۴/۳۰ <sup>a</sup>
۲	Control	۴/۶۰ <sup>d</sup>	۴/۷۵ <sup>e</sup>	۲/۵۵ <sup>nop</sup>	۳/۰۰ <sup>ij</sup>	۴/۶۰ <sup>a</sup>
۲	M3	۴/۳۰ <sup>i</sup>	۴/۵۰ <sup>i</sup>	۳/۰۰ <sup>klm</sup>	۳/۴۰ <sup>efg</sup>	۴/۷۰ <sup>a</sup>
۲	M6	۴/۱۰ <sup>l</sup>	۳/۳۰ <sup>s</sup>	۳/۱۰ <sup>jkl</sup>	۳/۲۰ <sup>ghi</sup>	۴/۶۰ <sup>a</sup>
۲	U28	۴/۵۵ <sup>e</sup>	۴/۸۰ <sup>c</sup>	۲/۹۵ <sup>klmn</sup>	۲/۹۵ <sup>j</sup>	۴/۶۵ <sup>a</sup>
۲	U40	۴/۵۵ <sup>e</sup>	۴/۷۵ <sup>e</sup>	۲/۹۵ <sup>klmn</sup>	۲/۹۵ <sup>j</sup>	۴/۶۵ <sup>a</sup>

۳/۸. <sup>m</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۳/۲. <sup>ghi</sup>	۲/۶. <sup>mno</sup>	۴/۳. <sup>m</sup>	۴/۲. <sup>k</sup>	U28-M3	۲
۳/۰. <sup>n</sup>	۴/۶. <sup>a</sup>	۳/۴. <sup>efg</sup>	۲/۷. <sup>lmno</sup>	۴/۸. <sup>q</sup>	۴/۸. <sup>l</sup>	U40-M3	۲
۳/۲۵. <sup>l</sup>	۴/۶. <sup>a</sup>	۳/۵. <sup>ef</sup>	۳/۳. <sup>ijk</sup>	۳/۹. <sup>r</sup>	۴/۰. <sup>m</sup>	U28-M6	۲
۳/۲۵. <sup>l</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۳/۵. <sup>e</sup>	۳/۳. <sup>ijk</sup>	۳/۹. <sup>r</sup>	۴/۸. <sup>l</sup>	U40-M6	۲
۴/۸. <sup>e</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۴. <sup>abc</sup>	۳/۷. <sup>fghi</sup>	۴/۸. <sup>p</sup>	۴/۸. <sup>b</sup>	Control	۳
۳/۷. <sup>g</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۳. <sup>cd</sup>	۳/۹. <sup>defgh</sup>	۴/۳. <sup>m</sup>	۳/۸. <sup>n</sup>	M3	۳
۳/۸. <sup>f</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۴/۲. <sup>d</sup>	۴/۰. <sup>cdefg</sup>	۳/۲. <sup>t</sup>	۳/۵. <sup>q</sup>	M6	۳
۴/۲. <sup>d</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۴. <sup>abcd</sup>	۴/۲. <sup>bcde</sup>	۴/۲. <sup>n</sup>	۴/۹. <sup>a</sup>	U28	۳
۴/۲. <sup>d</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۴. <sup>abcd</sup>	۴/۳. <sup>abcd</sup>	۴/۲. <sup>o</sup>	۴/۸. <sup>b</sup>	U40	۳
۳/۶. <sup>h</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۳. <sup>cd</sup>	۴/۸. <sup>cdef</sup>	۴/۴. <sup>k</sup>	۳/۸. <sup>n</sup>	U28-M3	۳
۳/۵. <sup>i</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۳. <sup>cd</sup>	۴/۲. <sup>bcde</sup>	۴/۳. <sup>m</sup>	۳/۷. <sup>o</sup>	U40-M3	۳
۳/۴. <sup>j</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۴/۳. <sup>cd</sup>	۳/۹. <sup>defgh</sup>	۳/۳. <sup>s</sup>	۳/۵. <sup>q</sup>	U28-M6	۳
۳/۳. <sup>k</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۳. <sup>cd</sup>	۳/۹. <sup>defgh</sup>	۳/۳. <sup>s</sup>	۳/۶. <sup>p</sup>	U40-M6	۳
۴/۴. <sup>c</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۴/۵. <sup>ab</sup>	۴/۳. <sup>abc</sup>	۴/۵. <sup>h</sup>	۴/۸. <sup>b</sup>	Control	۴
۲/۹. <sup>p</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۴. <sup>abcd</sup>	۳/۸. <sup>efgh</sup>	۴/۴. <sup>k</sup>	۳/۲. <sup>r</sup>	M3	۴
۲/۵. <sup>s</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۳. <sup>bcd</sup>	۳/۵. <sup>hij</sup>	۴/۳. <sup>l</sup>	۲/۹. <sup>u</sup>	M6	۴
۴/۶. <sup>b</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۴/۵. <sup>ab</sup>	۴/۶. <sup>ab</sup>	۴/۵. <sup>h</sup>	۴/۸. <sup>c</sup>	U28	۴
۴/۶. <sup>a</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۶. <sup>a</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۴/۶. <sup>g</sup>	۴/۸. <sup>c</sup>	U40	۴
۲/۸. <sup>q</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۴/۵. <sup>abc</sup>	۳/۹. <sup>defgh</sup>	۴/۵. <sup>i</sup>	۳/۸. <sup>s</sup>	U28-M3	۴
۲/۷. <sup>r</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۴. <sup>abc</sup>	۳/۸. <sup>efgh</sup>	۴/۴. <sup>j</sup>	۳/۰. <sup>t</sup>	U40-M3	۴
۲/۴. <sup>t</sup>	۴/۸. <sup>a</sup>	۴/۵. <sup>abc</sup>	۳/۶. <sup>ghi</sup>	۳/۳. <sup>s</sup>	۲/۸. <sup>v</sup>	U28-M6	۴
۲/۴. <sup>t</sup>	۴/۷. <sup>a</sup>	۴/۴. <sup>abc</sup>	۳/۶. <sup>ghi</sup>	۳/۰. <sup>u</sup>	۲/۸. <sup>v</sup>	U40-M6	۴

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

### نتیجه‌گیری

فرآیند سرخ کردن انجام گرفته، مطالعات بیشتری مورد نیاز است. از میان مدل‌های بررسی شده، یکی از مدل‌های پیشنهادی این پژوهش (مدل ۵ جدول ۲) بهتر از سایر مدل‌ها توانست روند جذب روغن را پیش‌بینی کند. پیش-تیمار فراصوت محتوای روغن تعادلی را افزایش و ثابت سرعت جذب روغن را کاهش داد. همچنین، پیش‌تیمار مایکروویو به ترتیب باعث کاهش و افزایش محتوای روغن تعادلی و ثابت سرعت جذب روغن نمونه‌ها شد.

استفاده از پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند جذب روغن قطعات سیب‌زمینی را طی سرخ کردن کاهش دهد. همچنین، به‌کارگیری پیش‌تیمار مایکروویو نیز به طور معنی‌داری جذب روغن قطعات سیب‌زمینی را کاهش داد و این اثر با افزایش توان مورد استفاده افزایش یافت. علاوه بر این، اعمال هر دو پیش‌تیمار فراصوت و مایکروویو به صورت تلفیقی در مقایسه با نمونه‌های شاهد و نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت تنها، به طور معنی‌داری جذب روغن را کاهش داد. در مورد پیش‌تیمار فراصوت، هنگامی‌که این پیش‌تیمار به صورت تلفیقی با مایکروویو به کار رفت، اثر بهتری از خود نشان داد؛ ولی به دلیل مطالعات کمی که در مورد اثر این پیش‌تیمار در

## منابع مورد استفاده

- برمور م، دهقان‌نیا ج و قنبرزاده ب، ۱۳۹۵، تأثیر ترکیبی پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی روی سینتیک دفع رطوبت طی سرخ‌کردن عمیق سیب‌زمینی، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۶، ۵۴۳-۵۶۱.
- دهقان‌نیا ج، باقری درویش‌محمد ح. و قنبرزاده ب. ۱۳۹۴. مدل‌سازی سینتیک چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با فراصوت و مایکروویو طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق. نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی، جلد ۴، شماره ۲، صفحات ۱۹۶-۱۸۳.
- رزاق‌پور، ا. دهقان‌نیا، ج. و قنبرزاده، ب. ۱۳۹۲، تأثیر پیش‌تیمار با فراصوت و آنزیم‌بری روی جذب روغن سیب‌زمینی طی سرخ‌کردن عمیق، نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی، ۲، ۳۲۸-۳۲۳.
- رونقی ط، دهقان‌نیا ج و قنبرزاده ب، ۱۳۹۵، مدل‌سازی تجربی جذب روغن و بررسی تأثیر امواج فراصوت و پوشش خوراکی طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۶، ۲۴۵-۲۲۱.
- عابدپور ل و دهقان‌نیا ج، ۱۳۹۵، بررسی میزان جذب روغن طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با فراصوت و آبیگری اسمزی، فصلنامه علوم و صنایع غذایی، ۱۳، ۹۴-۷۹.
- علیزاده‌زیناب س، دهقان‌نیا ج و خیابانی م ص، ۱۳۹۲، تأثیر آنزیم‌بری و هیدروکلونیدهای خوراکی روی کاهش جذب روغن طی سرخ‌کردن سیب‌زمینی قطعه‌شده، فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، ۱، ۳۶-۲۱.
- نقوی ع، دهقان‌نیا ج، قنبرزاده ب و رضایی‌مکرم ر، ۱۳۹۲، مدل‌سازی تجربی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با اولتراسوند و خشک‌کردن طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۸، ۱۱۱-۹۹.
- Adedeji AA, Ngadi MO and Raghavan GSV, 2009. Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering* 91: 146-153.
- AOAC, 1995. The official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- Bravo J, Sanjuan N, Ruales J and Mulet A, 2009. Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. *Drying Technology* 27: 782-786.
- Carrieri G, Anese M, Quarta B, Valeria De Bonis M and Ruocco G, 2010. Evaluation of acrylamide formation in potatoes during deep-frying: The effect of operation and configuration. *Journal of Food Engineering* 98: 141-149.
- Dehghan Nasiri F, Mohebbi M, Tabatabaee YF and Haddad MHK, 2011. Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Bioprocess Technology* 89: 241-247.
- Dehghannya J and Abedpour L, 2017. Influence of a three stage hybrid ultrasound-osmotic-frying process on production of low-fat fried potato strips. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, DOI:10.1002/jsfa.8617.
- Dehghannya J, Naghavi E-A and Ghanbarzadeh B, 2016. Frying of potato strips pretreated by ultrasound-assisted air-drying. *Journal of Food Processing and Preservation* 40(4), 583-592.
- Duran M, Pedreschi F, Moyano P and Troncoso E, 2007. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering* 81: 257-265.
- El-Dirani K, 2002. Textural and mass transfer characteristics of chicken nuggets during deep fat frying and oven baking. M.Sc. Thesis, McGill University.
- Farid M and Kizilel R, 2009. A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying and frying of food products. *Chemical Engineering and Processing* 48: 217-223.
- Farinu A and Baik OD, 2008. Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweetpotato. *Journal of Food Engineering* 89: 187-194.

- 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.
- Garayo J and Moreira R, 2002. Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering* 55: 181-191.
- Kassama LS and Ngadi MO, 2005. Pore structure characterization of deep-fat-fried chicken meat. *Journal of Food Engineering* 66: 369-375.
- 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, 2002. Deep-fat frying of foods", In J. Irudayaraj (Eds.), *Food processing operations modeling: Design and analysis*. Marcel Dekker, New York.
- Moyano PC and Pedreschi F, 2006. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT-Food Science and Technology* 39: 285-291.
- Moyano PC, Rioseco VK and Gonzalez PA, 2002. Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated French fries. *Journal of Food Engineering* 54: 249-255.
- 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: 438-440.
- Oztop MH, Sahin S and Sumnu G, 2007. Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. *Journal of Food Engineering* 79: 83-91.
- Pinthus EJ, Weinberg P and Saguy IS, 1995. Deep-fat fried potato product oil uptake as affected by crust physical properties. *Journal of Food Science* 60: 770-772.
- Sahin S and Sumnu G, 2009. *Advances in deep-fat frying of foods*. Taylor & Francis Group, New York.
- Song XJ, Zhang M and Mujumdar AS, 2007. Optimization of vacuum microwave predrying and vacuum frying conditions to produce fried potato chips. *Drying Technology* 25: 2027-2034.
- Soorgi M, Mohebbi M, Mousavi SM and Shahidi F, 2012. The effect of methylcellulose, temperature, and microwave pretreatment on kinetic of mass transfer during deep fat frying of chicken nuggets". *Food Bioprocess and Technology* 5: 1521-1530.
- Steel RGD, Torrie JH and Dickey DA, 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. McGraw-Hill, New York.
- Troncoso E and Pedreschi F, 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT-Food Science and Technology* 42: 1164-1173.
- Yildiz A, Palazoglu TK and Erdogdu F, 2007. Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering* 79: 11-17.
- Ziaiiifar 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.

## **Influence of potato processing with ultrasound and microwave pretreatments on oil uptake during frying**

**J Dehghannya<sup>1\*</sup>, H Bagheri-Darvish-Mohammad<sup>2</sup> and B Ghanbarzadeh<sup>1</sup>**

Received: March 5, 2017 Accepted: January 28, 2018

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

<sup>2</sup>MSc Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\*Corresponding author: E-mail: J\_dehghannya@tabrizu.ac.ir

### **Abstract**

The aim of this study was to investigate the effect of process conditions as well as ultrasound and microwave pretreatments on oil uptake during frying of potato slices. In this study, ultrasound pretreatment with two frequencies of 28 and 40 kHz and microwave pretreatment with two powers of 3 and 6 watts per gram was applied to the potato pieces. Then, the frying process was done at 150, 170 and 190°C for 1, 2, 3 and 4 min. The results showed that oil uptake is decreased or increased using the ultrasonic pretreatment depending on the process time and temperature. Oil uptake was reduced at the beginning of the process with low temperatures but was increased at the end of the process with high temperatures compared to controls. In addition, Microwave pretreatment significantly reduced oil uptake of the potato slices. Oil uptake was further reduced by increasing microwave power from 3 to 6 watts per gram. In addition, for predicting oil uptake with regard to the process conditions, six models including 2 models from the literature and 4 new models proposed in this study was examined. Considering the results of the fitted experimental data, ultrasound and microwave pretreatment increased and decreased the equilibrium oil content, respectively. Also, the ultrasound pretreatment reduced the oil uptake rate constant, but the microwave pretreatment increased it.

**Keywords:** Ultrasound waves, Microwaves, Potato, frying, Process modeling