

تأثیر فرکانس‌های تلفیقی و زمان اعمال پیش‌تیمار امواج فراصوت روی جذب روغن طی سرخ کردن قطعات

سیب‌زمینی

سمیرا محمدعلی‌نژاد^۱، جلال دهقان‌نیا^۲، سیدحسین جلالی^۳

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

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

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۶/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۷/۱۰)

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از امواج فراصوت، با توجه به اثرات مؤثر آن در فرآیندهای مختلف مواد غذایی رو به گسترش می‌باشد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر تلفیقی فرکانس‌های مختلف امواج فراصوت به صورت پیش‌تیمار روی جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی و تعیین زمان بهینه کاربرد این امواج بود. در این پژوهش، از امواج فراصوت تحت فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به صورت مجزا و تلفیقی به مدت ۳۰ دقیقه استفاده شد. استفاده از امواج فراصوت در هر دو فرکانس به صورت مجزا و تلفیقی، جذب روغن را کاهش داد. به طوری که استفاده از امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه بالاترین کاهش در جذب روغن را به میزان ۲۳/۱۹٪ از خود نشان داد. همچنین، مدل‌سازی جذب روغن بر حسب زمان، محتوای رطوبت، چروکیدگی و دانسیته ظاهری انجام شد و مدل‌هایی بر حسب دما و زمان سرخ‌کردن و فرکانس و زمان امواج فراصوت ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: سرخ‌کردن، جذب روغن، فراصوت، مدل‌سازی

مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی سولانوم توبروسوم^۱، از خانواده سولاناسه^۲ در حدود ۸۰٪ کشورهای دنیا رشد می‌کند (Pedreschi, 2012) و میزان تولید این محصول در ایران به میزان ۵۵۶۰۰۰۰ تن در سال می‌رسد (FAO, 2013). حدود ۷۵٪ سیب‌زمینی از آب تشکیل شده (Pedreschi, 2012) و ماده خشک آن شامل ترکیبات مختلفی از قبیل نشاسته، قند، پروتئین، اسیدهای آلی، ترکیبات فنلی، ویتامین‌ها، مواد معدنی و پلی‌ساکاریدهای غیر نشاسته‌ای می‌باشد (Kita, 2002). سیب‌زمینی حاوی درصد بالایی از ویتامین C بوده و میزان پتاسیم آن از موز نیز بالاتر است (Silver, 2013).

سرخ‌کردن یکی از فرآیندهایی است که به طور گسترده در صنعت غذا استفاده می‌شود و شامل غوطه‌ور کردن قطعات ماده غذایی در روغن‌های داغ می‌باشد. در این فرآیند، پدیده‌های انتقال جرم و حرارت به طور هم‌زمان رخ می‌دهند (Krokida et al., 2000). حرارت به روش کنوکسیون از روغن به ماده غذایی

و به روش هدایت در داخل ماده غذایی منتقل می‌شود (Farinu & baik, 2005). رطوبت نیز از ماده غذایی به روش انتشار مولکولی و جریان لوله‌موتین به روغن منتقل و به طور هم‌زمان روغن جذب ماده غذایی می‌شود (Ni & Datta, 1999). از دیدگاه مصرف‌کنندگان، طعم منحصر به فرد ماده غذایی سرخ شده مربوط به ویژگی‌های حسی از جمله عطر، طعم، بافت و ظاهر ماده غذایی می‌باشد (Saguy & Dana, 2003). سرخ‌کردن یک فرآیند آب‌گیری با سه ویژگی متمایز است؛ اول این که دمای بالای سرخ‌کردن باعث انتقال سریع حرارت و کاهش زمان پخت می‌شود. دوم، دمای محصول (به جز پوسته خارجی) به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نمی‌رسد و نهایتاً نشت مواد مغذی^۳ محلول در آب در حداقل میزان ممکن می‌باشد (Saguy & Pinthus, 1995). سرعت بالای انتقال حرارت، به دلیل اختلاف دمای بین روغن و نمونه بوده و خروج سریع آب به شکل بخار از محصول باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود (Pedreschi et al., 2005). حرارت‌دادن غذاهایی که در روغن‌های داغ غوطه‌ور می‌شوند، علاوه بر داشتن محاسنی نظیر

* نویسنده مسئول: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

1. *Solanum tuberosum*

2. Solanaceae

3. Leaching

همچنین زمان غوطه‌وری در محلول پوشش‌دهنده (۲ و ۴ دقیقه)، دمای سرخ کردن (۱۷۰، ۱۸۰، و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان سرخ کردن (۶، ۵، و ۷ دقیقه) بر کاهش جذب روغن با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شد (Khezripour et al., 2017). نتایج نشان داد که خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده‌ای که با مالتودکسترین پوشش داده شده بودند، از میزان روغن کمتری برخوردار بودند؛ به طوری که استفاده از پوشش مالتودکسترین، میزان روغن را تا ۹۳/۴۱ درصد کاهش داد. خلال‌های پوشش داده شده با مالتودکسترین (محلول ۵٪ و ۲ دقیقه غوطه‌وری) که در ۱۷۰ درجه به مدت ۶ دقیقه سرخ شده بودند، کمترین مقدار روغن (۹/۱۹٪) را داشتند. در پژوهشی دیگر، اثر پلی‌ساکارید محلول در آب سویا و صمغ عربی به عنوان هیدروکلوئیدهای پوشش‌دهنده در غلظت‌ها و زمان‌های غوطه‌وری مختلف بر میزان جذب روغن چیپس سیب‌زمینی بررسی گردید (Torabi et al., 2017). نتایج نشان داد با افزایش غلظت هیدروکلوئید و زمان غوطه‌وری رطوبت چیپس افزایش و از میزان روغن آن به‌طور هم‌زمان کاسته شد. بیشترین میزان کاهش جذب روغن توسط پلی‌ساکارید محلول در آب سویا (در غلظت ۱/۵ درصد و زمان ۴ دقیقه) به میزان ۵۳/۰۱ درصد بر اساس وزن مرطوب مشاهده شد. با پیشرفت فرآیند سرخ کردن و تبخیر آب از ماده غذایی، روغن که اساساً متشکل از تری-گلیسیریدهاست، در اثر وقوع واکنش‌های هیدرولیتیک تجزیه شده و به مخلوطی از مونوگلیسیریدها، دی‌گلیسیریدها و صدها ترکیب دیگر که تحت عنوان ترکیبات فعال سطحی از آن‌ها یاد می‌شود، تبدیل می‌شوند (جدول ۱).

رنگ، عطر، طعم و بافت مناسب، دارای معایبی نیز هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به تشکیل مواد نامطلوب اشاره کرد که از طریق واکنش مایلارد به‌وجود می‌آیند. سمومی نظیر آکریلامید، اتیل‌کاربامات، فوران، هتروسیکلیک‌آمین‌ها، هیدروکسی‌متیل-فورفورال و نیتروزآمین در اثر حرارت طی سرخ کردن تولید می‌شوند. بنابراین، باید روش‌هایی ارائه شود که میزان جذب روغن و مواد سمی را به حداقل رسانده و غذایی سالم و مغذی با کیفیت بالا فراهم کند (Toxicants, 2007). میزان جذب روغن در فرآیند سرخ کردن تابع عواملی نظیر کیفیت و ترکیب روغن، دما و زمان سرخ کردن، شکل هندسی نمونه، محتوای رطوبت، پیش‌تیمارها، کشش سطحی اولیه و تخلخل می‌باشد. مقدار رطوبت ماده غذایی به طور عمده تعیین‌کننده میزان جذب روغن می‌باشد؛ زیرا رطوبت خروجی سبب ایجاد فضاهای خالی از طریق لوله‌های موئین برای ورود بعدی روغن می‌شود (Pinthus et al., 1995). مصرف روغن و چربی‌های اشباع سبب ایجاد چاقی، سرطان و فشارخون بالا می‌شود؛ از طرفی محتوای روغن بالا در محصولات سرخ‌شده سبب می‌شود، فرآیند مورد نظر مقرون به صرفه نباشد (Karizaki et al., 2013). در سال‌های اخیر، پیش‌تیمارهای مختلفی برای کاهش جذب روغن پیشنهاد شده است که از جمله این پیش‌تیمارها می‌توان به خشک کردن مقدماتی، استفاده از پوشش‌های هیدروکلوئیدی مانند متیل سلولز، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز، مایکروویو، آب‌گیری اسمزی، آنزیم‌بری و سرخ کردن تحت خلأ اشاره داشت (Moyano & Pedreschi, 2006). در پژوهشی اثر مالتودکسترین به عنوان یک پوشش‌دهنده در سه غلظت (۳، ۱، و ۵ درصد) و

جدول ۱. عوامل مؤثر بر جذب روغن مواد غذایی طی فرآیند سرخ کردن

منبع	عوامل مؤثر بر جذب روغن
	افزایش‌دهنده
(Stier, 2000)	ترکیبات فعال سطحی حاصل از اکسیداسیون
(Pinthus and Saguy, 1994)	دفعات سرخ کردن
(Pinthus and Saguy, 1994)	کاهش کشش سطحی بین روغن و ماده غذایی
(Krokida et al., 2000)	کاهش ضخامت
(Rubnov and Saguy., 1997)	سختی سطح
	کاهش‌دهنده
(Krokida et al., 2000)	خشک کردن مقدماتی
(Shih et al., 2001)	پوشش‌دهی
(Krokida et al., 2000)	پایین بودن محتوای رطوبتی
	افزایش یا کاهش‌دهنده
(El-Dirani, 2002)	دمای سرخ کردن

باعث کاهش مقاومت داخلی و خارجی در برابر انتقال جرم می‌گردند (Ozuna et al., 2011). مطالعات زیادی در مورد استفاده از امواج فراصوت در فرآیندهایی نظیر خشک کردن کنوکسیون، آبیگری اسمزی و ... صورت گرفته است؛ اما منابع محدودی در مورد استفاده از این امواج به عنوان پیش تیمار قبل از فرآیند سرخ کردن وجود دارد.

روش‌های خشک کردن سنتی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده، ولی حذف رطوبت از قسمت‌های داخلی مواد غذایی امری زمان‌بر است؛ به علاوه، استفاده از دماهای بالا باعث آسیب به غذا شده و در نتیجه، رنگ، طعم و ارزش غذایی محصول خشک شده، تغییر پیدا می‌کند (Fernandes et al., 2008). امواج فراصوت با کاهش زمان و دمای خشک کردن و به دلیل ماهیت غیرحرارتی آن باعث بهبود ویژگی‌های کیفی محصولات خشک-شده می‌شوند (Garcia-perez et al., 2007). Jambrak et al. (2007)، از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در خشک کردن قارچ، کلم بروکسل و گل کلم استفاده نموده و بدین نتیجه رسیدند که این امواج باعث کاهش زمان فرآیندهای بعدی کنوکسیون و یا تصعید انجمادی شده و به دلیل تشکیل منافذ در این نمونه‌ها، ویژگی‌های جذب مجدد آب محصول نیز بهبود می‌یابد. در پژوهشی دیگر، اثر تلفیقی امواج فراصوت و خشک کردن اسمزی قطعات سیب‌زمینی به عنوان پیش تیمار قبل از سرخ کردن سیب‌زمینی مورد مطالعه قرار گرفت (Karizaki et al., 2013). قطعات سیب‌زمینی (4×4×7 mm) در محلول‌های اسمزی مختلف (محلول ۱۵٪ سدیم کلرید و محلول ۱۵٪ سدیم کلرید / ۵۰٪ ساکارز) در سه دمای ۲۵، ۴۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف با و بدون امواج فراصوت مورد فرآوری قرار گرفته و سپس در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲، ۴ و ۶ دقیقه سرخ شدند. نتایج نشان داد که استفاده از امواج فراصوت و خشک کردن اسمزی قبل از سرخ کردن، میزان جذب روغن را ۱۲/۵٪ کاهش داد. در پژوهشی دیگر، اثر امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در خشک کردن سیب مورد بررسی قرار گرفت (Nowacka et al., 2012). در این بررسی، تکه‌های سیب داخل حمام فراصوت با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ۳۵ کیلوهرتز در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه قرار داده شدند. سپس، تکه‌های سیب به روش کنوکسیون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که امواج فراصوت باعث کاهش ۳۰ الی ۴۱ درصدی زمان خشک کردن می‌شود. همچنین، ضریب انتشار مؤثر رطوبت بعد از ۱۰ دقیقه فرآوری توسط این امواج $2/168 \times 10^{-9}$ ، بعد از ۲۰ دقیقه فرآوری $2/058 \times 10^{-9}$ و بعد از ۳۰ دقیقه فرآوری $2/168 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه و برای سیب‌های شاهد $2/168 \times 10^{-9}$

مونوگلیسیریدها و دی‌گلیسیریدها باعث افزایش خاصیت کف‌کنندگی روغن می‌شوند. برخی از مواد حاصل از تجزیه روغن سبب کاهش کشش سطحی بین روغن و ماده غذایی شده و در نتیجه سبب افزایش جذب روغن می‌شود. با افزایش دفعات سرخ کردن، ترکیبات فعال سطحی به میزان بیشتری تولید شده و جذب روغن افزایش می‌یابد (Dana & Saguy, 2006).

صنایع غذایی مدرن همیشه به دنبال فناوری‌های نوین است. به عنوان مثال، پیشرفت‌های زیادی در زمینه استفاده از امواج فراصوت در فرآیندهای مختلف مواد غذایی به وجود آمده است. استفاده از این امواج، نه تنها مزایای زیادی در زمینه تولید و راندمان، کاهش زمان فرآیند، کیفیت بالاتر محصولات مختلف و کاهش ریسک‌های فیزیکی و شیمیایی دارد، بلکه با محیط زیست نیز سازگار است. امواج فراصوت در فرآیندهایی نظیر انجماد، خشک کردن، استریلیزاسیون، استخراج و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به طوری که از مزایای آن در فرآیندهای مواد غذایی می‌توان به مخلوط کردن مؤثر، انتقال جرم و انرژی سریع‌تر، کاهش دمای مورد نیاز برای فرآوری و تولید بیشتر اشاره نمود. امواج صوتی، امواج مکانیکی هستند که جهت عبور به یک محیط الاستیک نیاز دارند. هنگام عبور امواج از روی محیط الاستیک، ذرات دچار تغییر مکان طولی می‌شوند (Chemat et al., 2011). امواج فراصوت به امواج صوتی با فرکانس بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز گفته می‌شود. استفاده از امواج فراصوت در صنایع غذایی بسته به فرکانس و شدت آن به دو دسته طبقه‌بندی می‌گردد. دسته اول که به آن امواج فراصوت تخریبی نیز گفته می‌شود، دارای فرکانس‌های پایین (۲۰ - ۸۰۰ کیلوهرتز) و توان (شدت) بالا هستند. این دسته از امواج باعث ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی در ماده غذایی می‌شوند. دسته دوم که امواج فراصوت تشخیصی نیز نامیده می‌شوند، دارای فرکانس‌های بالا (۱۰ - ۲ مگاهرتز) و توان (شدت) پایین هستند. از این دسته نیز در تکنیک‌های آنالیزی استفاده می‌شود (Tao & Sun, 2013). امواج فراصوت، باعث انقباض و انبساط‌های متوالی و تشکیل حباب (کاویتاسیون)^۱ در مواد غذایی می‌شوند. انفجار حباب‌ها، باعث ایجاد اغتشاشات شدید موضعی و تلاطم‌های گردآب‌گونه و در نتیجه سبب افزایش انتقال جرم می‌گردد (Shotipruk, et al., 2001). علاوه بر آن، این امواج با ایجاد کانال‌های ریز میکروسکوپی باعث کاهش لایه مرزی انتشار و افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود (De la Fuente-Blanco et al., 2006). به عبارت دیگر، امواج فراصوت

تجهیزات

در این پژوهش، از سرخ‌کن خانگی (مدل F430.R، با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°C و دارای سنسور دمایی (ترموستات) توکار^۱ برای کنترل ترمواستاتیکی دما، آن کونوکسیونی (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن‌آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) جهت اندازه‌گیری محتوای رطوبت نمونه‌ها، کاتر دستی و دستگاه حمام فراصوت (AS ONE Corporation، مدل US-4R، ساخت ژاپن، ظرفیت ۹/۵ لیتر، ابعاد: ۳۶/۵ (طول) × ۳۰/۵ (عرض) × ۲۶/۲ (ارتفاع) سانتی‌متر مکعب، فرکانس نوسان: ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز، توان خروجی در حداکثر فرکانس: ۱۶۰ وات، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و همچنین زمان اولتراسونیکاسیون و بدون همزن) استفاده شد. دمای آب داخل حمام اولتراسوند در دمای ۲۵°C ثابت نگه داشته شد. افزایش دما طی آزمایش‌ها بعد از ۳۰ دقیقه فرآوری با اولتراسوند قابل ملاحظه نبود (کمتر از ۲°C). نسبت وزنی نمونه به آب ۱:۱۰ در نظر گرفته شد.

تهیه نمونه‌ها

سیب‌زمینی‌ها بعد از شستشو پوست‌گیری شده و سپس قطعات سیب‌زمینی توسط کاتر دستی به ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2 \text{ cm}^3$ ، به فرم مکعب مستطیل برش داده شدند. در مرحله بعد، سیب‌زمینی‌ها به منظور حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شسته شدند. رطوبت سطحی نیز به وسیله کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. بر اساس پیش‌تیمار صورت‌گرفته، نمونه‌ها به دسته‌های مختلف تقسیم گردیدند (جدول ۲).

شرایط سرخ‌کردن

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی در دستگاه سرخ‌کن با دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ 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، ۱۲۰-۱۰۰ گرم نمونه در آن قرار داده شده و قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده با رسیدن زمان سرخ‌کردن به زمان مورد نظر از سرخ‌کن خارج شدند. پس از حذف روغن سطحی نمونه‌ها با کاغذ جاذب، بلافاصله آنالیزهای مربوطه روی آن‌ها انجام گرفت. برای به حداقل رساندن تغییرات ویژگی‌های روغن به دلیل تخریب آن در طی سرخ‌کردن، هر ۱/۵ لیتر روغن فقط به مدت حدود ۴۵ دقیقه (هفت تا هشت بار سرخ‌کردن) استفاده

۱۰×۱/۸۲ مترمربع بر ثانیه بود. در این پژوهش، نمونه‌هایی که تحت ۳۰ دقیقه فرآوری توسط امواج فراصوت بودند، سریع‌تر از نمونه‌هایی که تحت ۱۰ و ۲۰ دقیقه فرآوری بودند، خشک شدند؛ اما چروکیدگی سیب‌های تیمار شده ۹-۱۱٪ بیشتر از سیب‌های شاهد بود. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که اثر زمان سونیکاسیون بر مواد مختلف، متفاوت است. به عنوان مثال، *Fernandes et al* (2008) اثر این پیش‌تیمار را در خشک‌کردن آناناس و موز بررسی کرده‌اند. در این پژوهش، زمان خشک‌کردن بعد از ۲۰ دقیقه فرآوری سریع‌تر از ۱۰ و ۳۰ دقیقه فرآوری بود. عواملی نظیر تخلخل در استفاده از امواج فراصوت طی خشک‌کردن دخیل می‌باشد (Tao & Sun, 2013). انقباض و انبساط‌های متوالی در مواد غذایی با تخلخل بالا به دلیل وجود فضاهای خالی بین سلولی، شدیدتر است. از طرف دیگر، مواد غذایی که تخلخل پایینی دارند، مقاومت بالاتری در مقابل انتقال جرم در داخل ماده غذایی نشان می‌دهند. بنابراین، تجزیه و تحلیل ساختار مواد غذایی اولین گام در هنگام استفاده از امواج فراصوت است (Tao & Sun, 2013).

مدل‌سازی شامل ساخت ابزارری با درجه دقت خوب و کافی می‌باشد که بتواند ویژگی‌های یک محصول یا فرآیند را پیشگویی کند (Trystram, 2012). مدل‌سازی جذب روغن بر حسب زمان، محتوای رطوبتی، چروکیدگی و دانسیته ظاهری می‌تواند به بهبود شرایط سرخ‌کردن و به عبارت دیگر کنترل بهینه شرایط فرآیند و در نتیجه کنترل کیفی محصول نهایی کمک کند. با توجه به این‌که تاکنون پژوهشی در مورد تعیین زمان بهینه استفاده از امواج فراصوت با فرکانس‌های مختلف در فرآیند سرخ‌کردن صورت نگرفته است و فقط پژوهش‌های اندکی در مورد اثر امواج فوق در این فرآیند در دسترس است، هدف از این پژوهش، مدل‌سازی و بررسی میزان جذب روغن و همچنین تعیین زمان بهینه استفاده از امواج فراصوت با فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز طی سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی بود.

مواد و روش‌ها

سیب‌زمینی (رقم آگریا) از بازار محلی تهیه و در سردخانه بالای صفر درجه نگهداری شد. ۲۴ ساعت قبل از سرخ‌کردن، سیب‌زمینی‌ها در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند تا با دمای محیط به تعادل برسند. محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب‌زمینی ۸۲٪ بود. روغن مورد استفاده در این مطالعه، روغن بهار (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه، تهیه شده در شرکت صنعتی بهشهر، ساخت ایران) بود.

V_t : حجم ماده غذایی در لحظه t (m^3)

دانسیتته ظاهری

وزن واحد حجم یک ماده، دانسیته ظاهری آن ماده نام دارد. برای نمونه‌هایی با شکل هندسی نامنظم، حجم ظاهری با استفاده از پیکنومتر مشخص شده و سپس با استفاده از رابطه زیر دانسیته ظاهری به دست می‌آید (Troncoso & Pedreschi, 2009):

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (\text{رابطه ۲})$$

ρ_{ap} : دانسیته ظاهری (g/cm^3)

M : جرم ماده غذایی (g)

V : حجم ظاهری ماده غذایی (cm^3)

حجم ظاهری با به‌کارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولون) با استفاده از پیکنومتر شیشه‌ای و مطابق فرمول ذیل محاسبه گردید (Naghavi et al., 2013; Ziaifar et al., 2010)

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho} \quad (\text{رابطه ۳})$$

V : حجم ظاهری (cm^3)

M : وزن نمونه (g)

M_1 : وزن پیکنومتر خالی و حلال (g)

M_2 : وزن پیکنومتر حاوی حلال و نمونه (g)

ρ : دانسیته تولون (kg/m^3)

مدل‌سازی جذب روغن

یکی از مدل‌های به‌کار برده شده در این پژوهش، مدل (2000)

Krokida et al، برای پیش‌بینی روند جذب روغن بود:

$$Y = Y_e (1 - \exp(-Kt)) \quad (\text{رابطه ۴})$$

Y : محتوای روغن در زمان t (گرم روغن بر گرم ماده جامد خشک)

Y_e : محتوای روغن تعادلی (گرم روغن بر گرم ماده جامد خشک)

K : ثابت سرعت جذب روغن ($1/s$)

t : زمان سرخ کردن (s)

مدل تجربی دیگری که به مدل مویانو و پدروسچی معروف است، برای توصیف روند جذب روغن در طی سرخ کردن استفاده شد بر اساس این مدل، محتوای روغن طی سرخ کردن به صورت زیر بیان می‌شود (Moyano & Pedreschi, 2006):

$$O = O_{eq} - O^* \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\frac{O^*}{O} = (Kt)^{-1} \quad (\text{رابطه ۶})$$

شد و سپس روغن جدید جایگزین گردید (Rahimi & Ngadi, 2014). آزمایش‌ها در ۲ تکرار صورت گرفت.

جدول ۲. تیمارهای مختلف و علامت‌های اختصاری آن‌ها

ردیف	تیمار
۱	شاهد
۲	امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه (U1)
۳	امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه (U2)
۴	امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه - امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه (U3)
۵	امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه - امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه (U4)
۶	امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه - امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه (U5)

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

۲: نمونه‌هایی که تحت امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند.

۳: نمونه‌هایی که تحت امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند.

۴: نمونه‌هایی که ابتدا تحت امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفته و بعد از اتمام این مدت، تحت امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شدند.

۵: نمونه‌هایی که ابتدا تحت امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شده و بعد از اتمام این مدت، تحت امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفتند.

۶: نمونه‌هایی که ابتدا تحت امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته و بعد از اتمام این مدت، تحت امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شدند.

محتوای روغن

میزان روغن نمونه‌های سرخ‌شده، به‌وسیله استخراج با حلال پترولیوم اتر در دستگاه سوکسله اندازه‌گیری شد (AOAC, 1995) و نتایج به شکل گرم روغن بر گرم ماده خشک گزارش گردید.

محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها از طریق خشک‌کردن آنها در آون با دمای $105 \pm 1^\circ C$ تا رسیدن به وزن ثابت انجام گرفت (AOAC, 1995).

میزان چروکیدگی

اثر زمان سرخ‌کردن بر کاهش حجم محصول (چروکیدگی) به صورت زیر بیان شد (Ziaifar et al., 2010):

$$S_{(t)} = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$S_{(t)}$: درصد چروکیدگی در لحظه t (بدون بعد)

V_0 : حجم اولیه ماده غذایی (m^3)

سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰، ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و چهار زمان سرخ‌کردن ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار (۱۴۴=۲×۴×۳×۶) سرخ شده و تأثیر هر کدام از پیش‌تیمارها روی جذب روغن آنالیز شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ (P < ۰/۰۵) انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر فرکانس‌های تلفیقی و زمان اعمال امواج فراصوت بر جذب روغن

با افزایش دما از ۱۵۰ به ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، جذب روغن در نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴). اثر دما روی جذب روغن یک بحث چالش-برانگیز است. Pedreschi *et al.* (2005)، گزارش کردند که افزایش دما باعث کاهش جذب روغن می‌شود و علت آن را تشکیل پوسته سفت و سخت در دماهای بالا دانستند که به عنوان مانعی در برابر جذب روغن می‌باشد. Raoult (1999) به این نتیجه رسید که دما اثر مستقیم روی جذب روغن طی سرخ‌کردن ندارد و بیشتر تحت تأثیر محتوای رطوبت ماده غذایی می‌باشد. پژوهش‌گران مختلفی نیز افزایش جذب روغن با افزایش دما را گزارش کرده‌اند (Alipour *et al.*, 2002; El-Dirani *et al.*, 2009; Alizadeh zinab *et al.*, 2013

$$O = \frac{O_{eq} Kt}{1 + Kt} \quad (\text{رابطه ۷})$$

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

O_{eq}: میزان روغن در زمان t=∞ (گرم روغن بر گرم ماده جامد خشک)

*O: محتوای روغن جذب شده در فاصله زمانی t تا t=∞

K: ثابت سرعت جذب روغن (1/s)

t: زمان سرخ کردن (s)

علاوه بر این دو مدل، از ۴ مدل دیگر نیز استفاده شد که در جدول ۳ ارائه شده است. این مدل‌ها داده‌های تجربی حاصل از آزمایش را با بالاترین ضریب تبیین (R²) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برازش کردند. برازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.14.0.739, (MATLAB R2012a) انجام شد. ضرایب مدل‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیونی چندمتغیره توسط نرم‌افزار EXCEL 2010 به‌دست آمدند. این ضرایب وابسته به شرایط فرآیند (دما و زمان سرخ-کردن، فرکانس و زمان امواج فراصوت) بودند.

تجزیه و تحلیل آماری

جهت بررسی تأثیر تلفیقی فرکانس‌های مختلف امواج فراصوت روی جذب روغن، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی پیاده شد. ۶ تیمار نشان‌داده‌شده در جدول ۲ در

جدول ۳. مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (۱-۶) و برحسب محتوای رطوبت، چروکیدگی و دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ‌کردن

شماره	مدل	منبع
۱	$O = \frac{a.b.t}{1+b.t}$	(Moyano & Pedreschi, 2006)
۲	$O = a.(1 - \exp(-b.t))$	(Krokida <i>et al.</i> , 2000)
۳	$O = \frac{a.t}{t+b}$	(Razzagh pour <i>et al.</i> , 2014)
۴	$O = a.t^b$	(Razzagh pour <i>et al.</i> , 2014)
۵	$O = \frac{1+t}{a.t+b}$	(Naghavi <i>et al.</i> , 2013)
۶	$O = \exp(-a.t^b)$	(Razzagh pour <i>et al.</i> , 2014)
۷	$O = a.(1 - M_t^b)$	(Razzagh pour <i>et al.</i> , 2014)
۸	$O = a.S^b$	(Alizadeh zinab <i>et al.</i> , 2013)
۹	$O = a.\rho^2 + b.\rho + c$	(Razzagh pour <i>et al.</i> , 2014)

در تمامی دماها با افزایش زمان سرخ‌کردن به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد (جدول ۴). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان جذب روغن در ابتدا به‌طور سریع افزایش یافت و با

شکل ۱- الف، محتوای روغن نمونه‌های شاهد سرخ‌شده در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۴ زمان، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه را نشان می‌دهد. محتوای روغن نمونه‌ها

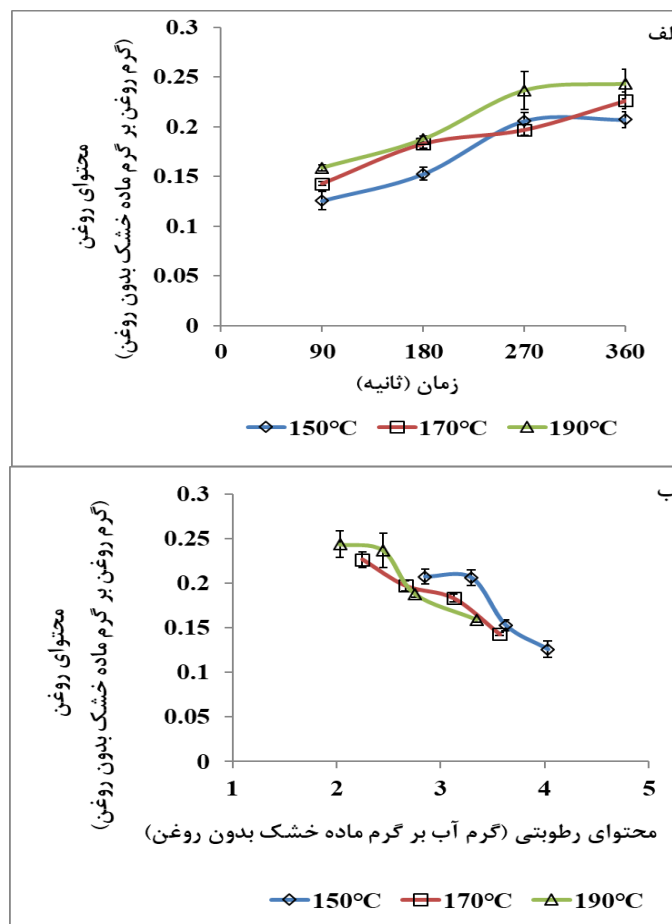
و ایجاد ساختار متخلخل در مواد غذایی می‌شود. با گذشت زمان، رطوبت سطحی ماده غذایی کاهش می‌یابد و با توجه به این که در ابتدای فرآیند، محتوای رطوبت نمونه‌ها و سرعت خروج رطوبت بالاست، به دلیل خروج رطوبت، تخلخل افزایش یافته و جذب روغن بیشتر می‌گردد. با گذشت زمان و کاهش رطوبت ماده غذایی، سرعت خروج رطوبت و به تبع آن ایجاد تخلخل در ماده غذایی کاهش یافته و این امر نیز به نوبه خود باعث کاهش سرعت جذب روغن در ادامه فرآیند می‌گردد (Sumnu & Sahin, 2010; Soorgi et al., 2012).

گذشت زمان و در مراحل بعدی تقریباً ثابت ماند (Gupta et al., 2000). در زمان‌های ابتدایی فرآیند با افزایش دما رطوبت بیشتری از محصول خارج شده و با باز شدن منافذ موئین، فضای لازم برای ورود بعدی روغن فراهم می‌شود و در نتیجه جذب روغن افزایش می‌یابد اما با گذشت زمان به دلیل کاهش محتوای رطوبتی و کاهش تخلخل جذب روغن تقریباً ثابت می‌ماند (Soorgi et al., 2012). با توجه به شکل ۱- ب، افزایش دما باعث کاهش رطوبت ماده غذایی و در نهایت سبب افزایش جذب روغن شد (Alizadeh zinab et al., 2013). بالا بودن محتوای رطوبت ماده غذایی باعث افزایش خروج رطوبت طی سرخ کردن

جدول ۴. مقایسه میانگین جذب روغن در دماها، زمان‌ها و پیش تیمارهای مختلف طی سرخ کردن

دما (°C)					
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک)					
۱۹۰	۱۷۰	۱۵۰	۱۹۰	۱۷۰	۱۵۰
۰/۱۹۴۷ ^a	۰/۱۷۳۴ ^b	۰/۱۴۹۰ ^c	۳۶۰	۲۷۰	۹۰
زمان (ثانیه)					
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک)					
۰/۲۰۷۶ ^a	۰/۱۹۳۴ ^b	۰/۱۶۰۹ ^c	۰/۱۲۷۶ ^d	شاهد	U1
U5	U4	U3	U2	U1	شاهد
۰/۱۸۵۸ ^a	۰/۱۵۴۲ ^{bc}	۰/۱۸۴۵ ^a	۰/۱۴۵۱ ^c	۰/۱۷۵۷ ^{ab}	۰/۱۸۸۹ ^a
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک)					

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



شکل ۱. محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده (شاهد) با گذشت زمان (الف) و محتوای رطوبتی طی سرخ کردن عمیق در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد (ب)

به مدت ۳۰ دقیقه (U2)، کمترین میزان جذب روغن را در مقایسه با سایر پیش تیمارها از خود نشان دادند. میزان ایجاد حباب یا افزایش انبساط و انقباض‌های متوالی در نتیجه اعمال امواج فراصوت وابسته به فرکانس آن است (Shamaei *et al.*, 2012). استفاده از امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه سبب افزایش انبساط و انقباض‌های متوالی شده و کانال‌های ریز متعددی در ماده غذایی ایجاد می‌شود (Simal *et al.*, 1998) و این امر سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و در نتیجه کاهش محتوای رطوبت اولیه سیب‌زمینی شده و متعاقب آن باعث کاهش میزان جذب روغن می‌شود (Karizaki *et al.*, 2013). در مقابل، امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز در زمان ۳۰ دقیقه اثر معنی‌داری روی کاهش جذب روغن نداشت (U1). در استفاده از امواج فراصوت با فرکانس حدود ۲۵ کیلوهرتز بیان شده است که این امواج توسط محیطی که ماده غذایی را احاطه کرده، جذب می‌شوند و به مقدار جزئی در ماده غذایی نفوذ می‌کنند (Garcia-Noguera *et al.*, 2010)، بنابراین، روی ماده غذایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای از خود بر جای نمی‌گذارند.

در فرکانس‌های تلفیقی نیز، استفاده از امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در زمان‌های ۱۵ و ۲۰ دقیقه (به ترتیب در پیش تیمارهای U3 و U5)، اثر معنی‌داری روی کاهش جذب روغن نداشت. علت این امر، احتمالاً به دلیل تشکیل ناکافی کانال‌های ریز در ماده غذایی باشد. همچنین، در این تیمارها به دلیل این‌که از امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت زمان کمتری (۱۵ و ۱۰ دقیقه، به ترتیب در پیش تیمارهای U3 و U5) استفاده شده است، احتمالاً تغییرات ساختاری قابل توجهی در ماده غذایی ایجاد نشده و تخریبی به وجود نیامده است (Fernandes *et al.*, 2008; Shamaei *et al.*, 2012).

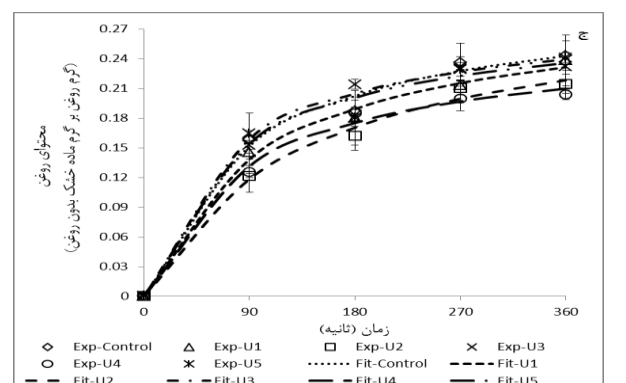
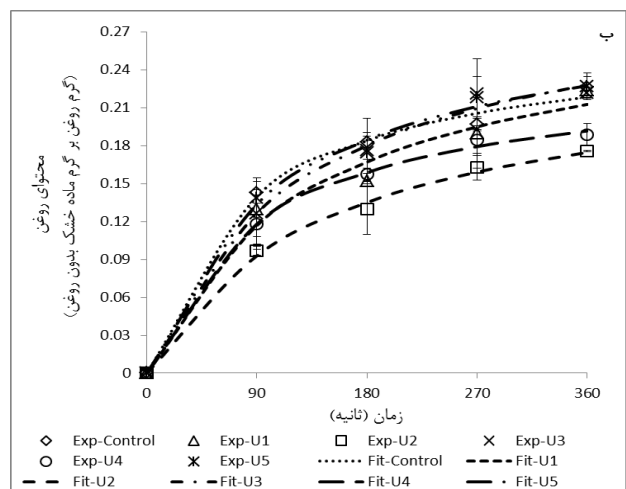
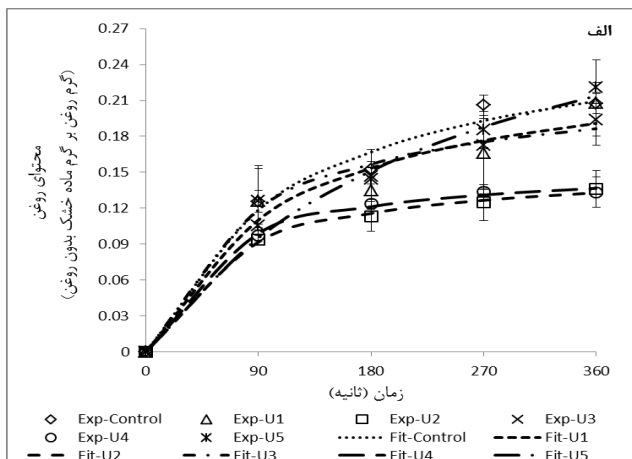
با بررسی کلی نمونه‌های پیش تیمار شده با امواج فراصوت به صورت مجزا و تلفیقی ملاحظه می‌شود که استفاده از امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه اثر معنی‌داری روی جذب روغن نداشت اما استفاده از این امواج به مدت ۲۰ دقیقه (U4) نتیجه بهتری در کاهش جذب روغن حاصل کرد. این نتیجه، در تطابق با نتایج حاصل از پژوهش Fernandes *et al.* (2008) بود. محققان مذکور از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در خشک کردن آناناس استفاده نمودند. در این پژوهش، قطعات آناناس تحت امواج فراصوت با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از امواج فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه در مقایسه با مدت ۱۰ و ۳۰ دقیقه،

میانگین جذب روغن در نمونه‌های شاهد نسبت به تمام نمونه‌های پیش تیمار شده با امواج فراصوت بیشتر بود (جدول ۴). مطابق جدول ۲، پیش تیمارهای U1، U2، U3، U4 و U5 به ترتیب باعث کاهش ۶/۹۹، ۲۳/۱۹، ۲/۱۸، ۱۸/۳۷ و ۱/۶۴ درصدی در جذب روغن شدند. کاهش در محتوای روغن نمونه‌هایی که تحت پیش تیمارهای U2 و U4 قرار گرفته بودند، نسبت به نمونه‌های شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود ($P < 0.05$). امواج فراصوت، باعث ایجاد انبساط و انقباض‌های متوالی (اثر اسفنجی^۱) در ماده غذایی می‌شوند. نیروهای درگیر در این مکانیزم فیزیکی بر کشش سطحی که سبب حفظ رطوبت در داخل ماده غذایی می‌شود، غلبه کرده و با تشکیل کانال‌های ریز میکروسکوپی سبب تسهیل خروج رطوبت از ماده غذایی (از طریق این کانال‌ها) می‌شود. در اثر ایجاد کانال‌ها، ساختار میکروسکوپی ماده غذایی متخلخل تغییر می‌کند و در نهایت سبب کاهش لایه مرزی انتشار و افزایش انتقال جرم می‌شود. انبساط و انقباض‌های متوالی سبب تشکیل حباب (کاویتاسیون^۲) شده و انفجار این حباب‌ها باعث ایجاد فشار موضعی می‌گردد و در نهایت سهولت خروج رطوبت را به دنبال خواهد داشت (De la fuenete-blanco *et al.*, 2006; Shamaei *et al.*, 2012). بنابراین، می‌توان انتظار داشت که به‌کاربردن پیش تیمار فراصوت با ایجاد تغییرات ساختاری و ایجاد کانال‌های ریز میکروسکوپی در سیب‌زمینی سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شود. از این‌رو، می‌توان کاهش جذب روغن در حین فرآیند را به بالا بودن فشار بخار در داخل ماده غذایی نسبت داد که از ورود روغن به درون سیب‌زمینی جلوگیری می‌کند (Razzagh pour *et al.*, 2014). همچنین، استفاده از امواج فراصوت در فرآیند سرخ‌کردن سیب‌زمینی از طریق افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و کاهش زمان سرخ‌کردن، باعث کاهش جذب روغن می‌شود (Razzagh pour *et al.*, 2014).

شکل ۲، منحنی تغییرات محتوای روغن در تیمارهای شاهد و همچنین پیش تیمار شده با امواج فراصوت در دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز (به صورت مجزا) و تیمار شده با فرکانس‌های تلفیقی امواج فراصوت (مطابق جدول ۲) و سپس سرخ‌شده در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در حالت کلی، نمونه‌های شاهد بیشترین و نمونه‌های پیش تیمار شده با امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز

1. Sponge effect
2. Cavitation

سرعت ویژه جذب روغن (K) با افزایش دما از ۱۵۰ به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد از لحاظ آماری در سطح ۰.۰۵٪ معنی‌دار نبود (جدول‌های ۶ و ۷). ولی، همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، با افزایش دما محتوای روغن تعادلی افزایش یافت (جدول‌های ۶ و ۷). این رفتار با این واقعیت که دماهای بالا باعث افزایش جذب روغن می‌شوند، مطابقت دارد.



شکل ۲. نمودارهای جذب روغن قطعات سیب‌زمینی تیمارهای مختلف مطابق جدول ۲ بر اساس داده‌های آزمایشی (Exp) و داده‌های حاصل از برازش (Fit) با مدل ۱ جدول ۳ (Moyano & Pedreschi, 2006) در دماهای ۱۵۰°C (الف)، ۱۷۰°C (ب) و ۱۹۰°C (ج)

تأثیر بیشتری در افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و کاهش زمان خروج رطوبت داشت. پس از فرآوری قطعات آناناس با امواج فراصوت به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه، زمان لازم برای کاهش ۹۰٪ میزان رطوبت محصول به ترتیب ۱۸۹، ۱۳۷ و ۱۶۳ دقیقه بود. این امر احتمالاً به تأثیرات نامطلوب فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه روی ساختار سلولی ماده غذایی و در نتیجه کاهش ضریب انتشار مؤثر رطوبت مرتبط باشد. بنابراین، با توجه به نتایج این پژوهش و پژوهش‌های مشابه دیگر، می‌توان زمان بهینه استفاده از فرکانس ۲۸ کیلوهرتز را ۲۰ دقیقه در نظر گرفت.

مدل‌سازی جذب روغن در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فرکانسهای تلفیقی امواج فراصوت در زمان‌های مختلف و معتبرسازی آن

شکل ۲ علاوه بر تأثیر امواج فراصوت روی جذب روغن، منحنی برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه را با مدل ۱ جدول ۳ (Moyano & Pedreschi, 2006) نشان می‌دهد. جدول ۳، مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی به صورت تابعی از زمان (۶-۱) و محتوای رطوبت، چروکیدگی و دانسیته ظاهری را نشان می‌دهد (۹-۷). بررسی پارامترهای آماری این مدل‌ها (داده‌ها نشان داده نشده‌اند) نشان داد که تمامی مدل‌ها دارای R^2 بالا و RMSE پایین بوده و به خوبی قادر به برازش داده‌های آزمایشی هستند و در شرایط عملیاتی مختلف می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در مرحله بعد، با هدف به‌دست‌آوردن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و پارامترهای فرآیند (دما و زمان سرخ‌کردن، فرکانس و زمان امواج فراصوت) تجزیه و تحلیل رگرسیونی چندمتغیره صورت گرفت. جدول ۵ مدل‌های به‌دست‌آمده از این طریق را نشان می‌دهد. با استفاده از معادلات جدول ۵ می‌توان ضرایب a و b را بر حسب دما و زمان سرخ‌کردن و همچنین فرکانس و زمان فراصوت به‌دست‌آورد و با جایگذاری این ضرایب در مدل‌های جدول ۳، جذب روغن را محاسبه کرد.

مطابق رابطه‌های ۴ و ۷، پارامترهای a و b در مدل‌های ۱ و ۲ جدول ۳ به ترتیب بیانگر محتوای روغن تعادلی (حداکثر روغن جذب شده در زمان‌های طولانی فرآیند) و سرعت ویژه جذب روغن می‌باشند. سرعت ویژه جذب روغن به عواملی نظیر نوع محصول، نوع روغن، شرایط سرخ‌کردن و پیش‌تیمارهای انجام‌شده بستگی دارد (Rahimi & Ngadi, 2014). تغییر در

جدول ۵. مدل‌های چندمتغیره برای ثابت‌های مدل‌های (۶-۱) جدول ۳ بر حسب شرایط فرآیند

R^2	ضرایب مدل $O = \frac{abt}{1+bt}$
۰/۹۷۵	$a = -0.00014F_{u1} - 0.00015t_1 + 0.003232F_{u2} - 0.00108t_2 + 0.001085T$
۰/۹۳۴	$b = 3.24E - 05F_{u1} - 0.00034t_1 - 3E - 05F_{u2} + 5.94E - 05t_2 + 8.21E - 05T$
R^2	ضرایب مدل $O = a.(1 - \exp(-bt))$
۰/۹۸۰	$a = 7.31E - 05F_{u1} - 0.00087t_1 + 0.002374F_{u2} - 0.00038t_2 + 0.000885T$
۰/۹۶۴	$b = 3.98E - 05F_{u1} - 0.00019t_1 - 3.7E - 05F_{u2} + 5.8E - 05t_2 + 6.64E - 05T$
R^2	ضرایب مدل $O = \frac{at}{t+b}$
۰/۹۷۵	$a = -0.00013F_{u1} - 0.00013t_1 + 0.003232F_{u2} - 0.00107t_2 + 0.001083T$
۰/۸۸۴	$b = -1.13833F_{u1} + 3.247337t_1 + 0.965278F_{u2} - 0.78933t_2 + 0.44711T$
R^2	ضرایب مدل $O = at^b$
۰/۹۶۲	$a = -0.00319F_{u1} - 0.0041t_1 + 0.001903F_{u2} + 0.000431t_2 + 0.000944T$
۰/۹۷۷	$b = 0.00671F_{u1} + 0.00502t_1 - 0.00303F_{u2} - 0.001t_2 + 0.000636T$
R^2	ضرایب مدل $O = \frac{1+t}{at+b}$
۰/۹۶۹	$a = -0.00132F_{u1} - 0.005231t_1 - 0.04356F_{u2} + 0.0059751t_2 + 0.030804T$
۰/۹۴۱	$b = -3.16574F_{u1} + 12.34174t_1 - 1.59815F_{u2} - 0.50492t_2 + 2.272568T$
R^2	ضرایب مدل $O = \exp(-at^b)$
۰/۹۵۸	$a = -0.02305F_{u1} + 0.094118t_1 + 0.023241F_{u2} - 0.03191t_2 + 0.025109T$
۰/۹۶۶	$b = 0.0002825F_{u1} - 0.0025t_1 - 0.00157F_{u2} + 0.001074t_2 - 0.00082T$

F_{u1} , F_{u2} , t_1 و t_2 به ترتیب بیانگر فرکانس اولیه، فرکانس ثانویه، زمان فرکانس اولیه، زمان فرکانس ثانویه و دمای سرخ کردن می‌باشد. پیش تیمارهای U1 و U2 به صورت دو زمان ۱۵ دقیقه‌ای در نظر گرفته شدند.

جدول ۶. مقایسه میانگین سرعت ویژه جذب روغن (K) و محتوای روغن تعادلی (O_{eq}) مدل ۱ جدول ۳ در دماها و پیش تیمارهای مختلف

طی سرخ کردن						
دما (°C)						
K(s ⁻¹)						
O_{eq} (g oil/g dry solid)						
تیمار	شاهد	U1	U2	U3	U4	U5
K(s ⁻¹)	۰/۰۱۰۷ ^a	۰/۰۰۸۷ ^a	۰/۰۱۱۲ ^a	۰/۰۱۲۹ ^a	۰/۰۱۳۹ ^a	۰/۰۰۹۳ ^a
O_{eq} (g oil/g dry solid)	۰/۲۸۶۳ ^{ab}	۰/۲۸۵۱ ^{ab}	۰/۲۴۰۴ ^a	۰/۲۸۶۶ ^{ab}	۰/۲۲۰۴ ^b	۰/۳۱۹۹ ^a

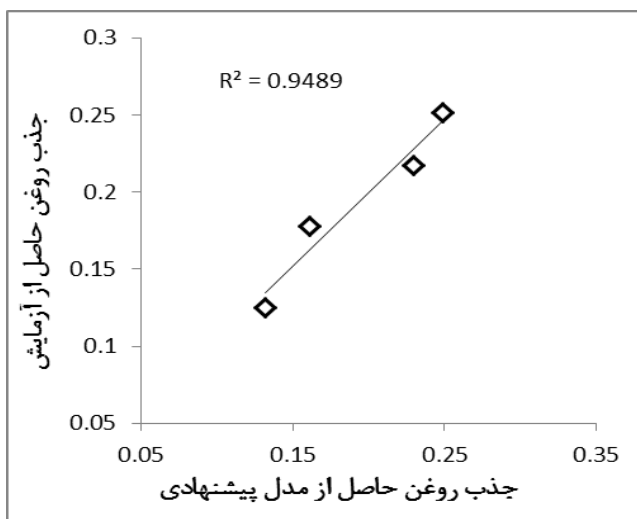
حروف لاتین متفاوت در هر سطر بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

جدول ۷. مقایسه میانگین سرعت ویژه جذب روغن (K) و محتوای روغن تعادلی (O_{eq}) مدل ۲ جدول ۳ در دماها و پیش تیمارهای مختلف

طی سرخ کردن						
دما (°C)						
K(s ⁻¹)						
O_{eq} (g oil/g dry solid)						
تیمار	شاهد	U1	U2	U3	U4	U5
K(s ⁻¹)	۰/۰۰۹۸ ^a	۰/۰۰۸۳ ^a	۰/۰۰۹۷ ^a	۰/۰۱۰۷ ^a	۰/۰۱۱۶ ^a	۰/۰۰۸۶ ^a
O_{eq} (g oil/g dry solid)	۰/۲۲۹۶ ^a	۰/۲۲۳۸ ^{ab}	۰/۱۸۵۵ ^{bc}	۰/۲۲۷۱ ^a	۰/۱۸۰۳ ^c	۰/۲۴۴۲ ^a

حروف لاتین متفاوت در هر سطر بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

شاهد ۲۳/۱۹٪ کاهش نشان داد (جدول ۴). از میان مدل‌های بررسی شده، مدل ۴ جدول ۳ بهتر از سایر مدل‌ها توانست روند جذب روغن قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن را پیش‌بینی کند. با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیونی چندمتغیره مدل‌هایی بر حسب دما و زمان سرخ کردن و فرکانس و زمان امواج فراصوت ارائه شد که با استفاده از این مدل‌ها می‌توان جذب روغن را در هر لحظه پیش‌بینی کرد.



شکل ۳. برازش جذب روغن حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل ۴ جدول ۳

به منظور معتبرسازی مدل‌ها، قطعات سیب‌زمینی ابتدا تحت امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۲/۵ دقیقه و سپس فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۷/۵ دقیقه قرار گرفتند. در مرحله بعد، نمونه‌ها در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ شدند. نتایج حاصل از برازش مقادیر جذب روغن حاصل از آزمایش با مقادیر جذب روغن پیش‌بینی شده با مدل ۴ جدول ۳ (به عنوان یک مدل نمونه) در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل، انطباق مناسبی بین داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از این مدل وجود داشت ($R^2 = 0.9489$).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق فرکانس‌های مختلف امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار قبل از فرآیند سرخ کردن می‌تواند به طور مؤثری منجر به تولید سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده کم-چرب شود. امواج فراصوت در کلیه نمونه‌ها جذب روغن را کاهش داد. زمان بهینه استفاده از امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به ترتیب ۲۰ و ۳۰ دقیقه بود. میزان جذب روغن در نمونه بهینه (نمونه‌هایی که تحت امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفته بودند)، ۰/۱۴۵۱ گرم روغن بر گرم ماده خشک بود و در مقایسه با نمونه

REFERENCES

- Alipour, M., Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., & Jafari, M. (2009). Effects of carrageenan, oil temperature and time of frying on oil uptake of fried potato products. *Iranian Food Science and Technology Research Journal* 5(1): 21-27 (In Farsi).
- Alizadeh zinab, S., Deghannya, J., & Sowti, M. (2013). Effect of blanching and edible hydrocolloids on reducing oil uptake during frying of potato slices. *Innovative Food Technologies* 1(1), 21-36 (In Farsi).
- AOAC (1995). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists, Association of Official Analytical Chemists.
- Chemat, F., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrasonics sonochemistry*, 18(4), 813-835.
- Dana, D., & Saguy, I. S. (2006). Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. *Advances in Colloid and Interface Science*, 128, 267-272.
- De la Fuente-Blanco, S., De Sarabia, E. R.-F., Acosta-Aparicio, V., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.
- El-Dirani, K. (2002). Textural and mass transfer characteristics of chicken nuggets during deep fat frying and oven baking. M. Sc. Thesis, McGill University.
- Farinu, A., & Baik, O.-D. (2005). Deep fat frying of foods—Transport Phenomena. *Food Reviews International*, 21(4), 389-410.
- Fernandes, F. A., Linhares, F. E., & Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics sonochemistry*, 15(6), 1049-1054.
- Garcia-Noguera, J., Oliveira, F. I., Gallão, M. I., Weller, C. L., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. (2010). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), 294-303.
- Garcia-Perez, J., Cárcel, J., Benedito, J., & Mulet, A. (2007). Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3), 247-254.
- Gupta, P., Shivhare, U., & Bawa, A. (2000). Studies on frying kinetics and quality of French fries. *Drying Technology*, 18(1-2), 311-321.
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Paniwnyk, L., & Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button

- mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 88-97.
- Karizaki, V. M., Sahin, S., Sumnu, G., Mosavian, M. T. H., & Luca, A. (2013). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment on deep fat frying of potatoes. *Food and Bioprocess Technology*, 6(12), 3554-3563.
- Khezripourarab, M., Hojjati, M., & Samavati, V. (2017). Effect of maltodextrin coating on properties of French fries using response surface methodology. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 13(60), 25-36 (In Farsi).
- Kita, A. (2002). The influence of potato chemical composition on crisp texture. *Food Chemistry*, 76(2), 173-179.
- Krokida, M., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. (2000). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44(1), 39-46.
- Moyano, P. C., & Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT-Food Science and Technology*, 39(3), 285-291.
- Naghavi, E., Dehghannya, J., & Ghanbarzadeh, B. (2013). Oil uptake modeling during deep-fat frying of potato strips pretreated with ultrasound and drying. *Journal of Food Research* 23(3), 393-410 (In Farsi)
- Ni, H., & Datta, A. (1999). Moisture, oil and energy transport during deep-fat frying of food materials. *Food and Bioprocesses Processing*, 77(3), 194-204.
- Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 427-433.
- Ozuna, C., Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., & Mulet, A. (2011). Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(14), 2511-2517.
- Pedreschi, F. (2012). Frying of potatoes: Physical, chemical, and microstructural changes. *Drying Technology*, 30(7), 707-725.
- Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C., & Moyano, P. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. *International journal of food properties*, 8(2), 289-299.
- Pinthus, E., Weinberg, P., & Saguy, I. (1995). Deep-fat fried potato product oil uptake as affected by crust physical properties. *Journal of Food Science*, 60(4), 770-772.
- Pinthus, E. J., & Saguy, I. (1994). Initial interfacial tension and oil uptake by deep-fat fried foods. *Journal of food science*, 59(4), 804-807.
- Rahimi, J., & Ngadi, M. O. (2014). Effect of batter formulation and pre-drying time on oil distribution fractions in fried batter. *LWT-Food Science and Technology*, 59(2), 820-826.
- Raoult-Wack, A.-L. (1999). Kinetics of moisture loss and fat absorption during frying for different varieties of plantain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 291-299.
- Razzagh pour, E., Dehghannya, J., & Ghanbarzadeh, B. (2014). Effect of ultrasound and blanching on oil uptake during deep fat frying of potato. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology* 2(4), 322-338 (In Farsi)
- Rubnov, M., & Saguy, I. (1997). Fractal Analysis and Crust Water Diffusivity of a Restructured Potato Product During Deep-Fat Frying. *Journal of food science*, 62(1), 135-137.
- Saguy, I. S., & Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of food engineering*, 56(2), 143-152.
- Saguy, I. S., & Pinthus, E. J. (1995). Oil uptake during deep-fat frying: factors and mechanism. *Food technology (USA)*.
- Shamaei, s., emam-djomeh, z., & moini, s. (2012). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties. *Journal of Texture Studies*, 43(2), 133-141.
- Shih, F., Daigle, K., & Clawson, E. (2001). Development of Low Oil-Uptake Donuts. *Journal of food science*, 66(1), 141-144.
- Shotipruk, A., Kaufman, P. B., & Wang, H. Y. (2001). Feasibility study of repeated harvesting of menthol from biologically viable menthaxpiperata using ultrasonic extraction. *Biotechnology progress*, 17(5), 924-928.
- Silver, B. (2013). Potatoes. *Journal of Agricultural & Food Information* 14(2), 91-97.
- Simal, S., Benedito, J., Sánchez, E. S., & Rosselló, C. (1998). Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. *Journal of food engineering*, 36(3), 323-336.
- Soorgi, M., Mohebbi, M., Mousavi, S. M., & Shahidi, F. (2012). The effect of methylcellulose, temperature, and microwave pretreatment on kinetic of mass transfer during deep fat frying of chicken nuggets. *Food and Bioprocess Technology* 5(5), 1521-1530.
- Stier, R. F. (2000). Chemistry of frying and optimization of deep-fat fried food flavour—an introductory review. *European journal of lipid science and technology*, 102(8-9), 507-514.
- Sumnu, S. G., & Sahin, S. (2008). *Advances in deep-fat frying of foods*: CRC Press.
- Tao, Y., & Sun, D.-W. (2015). Enhancement of food processes by ultrasound: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(4), 570-594.
- Torabi, R., Hojjati, M., Barzegar, M., & Jooyandeh, H. (2017). Effect of hydrocolloid coatings in preventing acrylamide formation and reducing oil uptake in potato chips. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 12(1), 109-120 (In Farsi).

- Toxicants, H.-G. F. (2007). Identification, characterization and risk minimization, EC Project, Contract Food-CT-2003-506820-STREP, 2003. *Tabulated information on known cooking/processing contaminants*.
- Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT-Food Science and Technology*, 42(6), 1164-1173.
- Trystram, G. (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering* 110(2), 269-277.
- Ziaiiifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering* 33(2), 191-212.