

تأثیر فرکانس‌های تلفیقی و ترکیب‌های زمانی متفاوت امواج فراصوت روی دفع رطوبت طی سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی

سمیرا محمدعلی نژاد^۱، جلال دهقان‌نیا^{۲*}، سیدحسین جلالی

۱- دانشجوی 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: ۹۳/۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۹)

چکیده

دفع رطوبت از ماده غذایی در فرآیند سرخ کردن عمیق رابطه تنگاتنگی با جذب روغن دارد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر فرکانس‌های تلفیقی امواج فراصوت روی روند دفع رطوبت طی سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی و مدل‌سازی دفع رطوبت بود. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها تحت پیش‌تیمار امواج فراصوت با فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به صورت مجزا و تلفیقی به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند و سپس در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ شدند. برای مدل‌سازی محتوای رطوبت از قانون انتشار فیک استفاده شد. ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل از داده‌های آزمایشی بین $1/823 \times 10^{-8}$ و $4/377 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه متغیر بود. میانگین ضریب تبیین بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از انتشار فیکی $0/986$ بود. استفاده از پیش‌تیمار امواج فراصوت با فرکانس‌های مجزا و تلفیقی سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شد؛ به طوری که این افزایش در برخی نمونه‌ها معنی‌دار و در برخی دیگر غیرمعنی‌دار بود. در این مطالعه، از مدل‌های تجربی برای بررسی روند دفع رطوبت طی سرخ کردن استفاده شد. همچنین، اثر دما روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت از طریق معادله آرنیوس محاسبه گردید.

کلید واژگان: سرخ کردن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، امواج فراصوت، مدل‌سازی

*مسئول مکاتبات: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

سرخ کردن یک روش پخت سریع و نوعی فرآیند دفع رطوبت می‌باشد [۱]. دفع رطوبت از ماده غذایی با مکانیسم‌های انتشار مولکولی، جریان لوله موئین و انتشار بخار صورت می‌گیرد [۲، ۳ و ۴]. انتقال حرارت از روغن به ماده غذایی باعث تبدیل رطوبت داخل آن به بخار شده و این امر منجر به ایجاد اختلاف فشار و در نتیجه سبب دفع رطوبت از مرکز به سمت پوسته ماده غذایی می‌گردد. همزمان، روغن در نواحی آسیب‌دیده به سطح ماده غذایی چسبیده و در مرحله سرد شدن، وارد فضاهای خالی که توسط دفع بخار آب ایجاد شده‌اند، می‌گردد. دفع بخار آب در حین فرآیند، مانع ورود روغن می‌شود و تا زمانی که رطوبت داخل ماده غذایی حفظ شود، می‌تواند از ورود بعدی روغن جلوگیری نماید [۵].

استفاده از امواج فراصوت در فرآیندهای مختلف به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. این امواج، هنگام عبور از یک محیط مفروض، سبب انبساط و انقباض‌های متوالی شده و پدیده حفره‌زایی^۱ به وقوع می‌پیوندد [۶]. تاکنون، مطالعات اندکی در زمینه استفاده از امواج فراصوت در فرآیند سرخ کردن صورت گرفته است؛ اما پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از این امواج در خشک کردن موجود است. فرناندز و همکاران [۷ و ۸]، اثر پیش تیمار امواج فراصوت را در خشک کردن موز و آناناس بررسی کردند. نتایج نشان داد که امواج فراصوت سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت می‌شود و دلیل آن را به کانال‌های ریز ایجاد شده در داخل ماده غذایی نسبت دادند که باعث تسهیل دفع رطوبت می‌شود. همچنین، استفاده از امواج فراصوت در خشک کردن هویج و پوست لیمو به ترتیب زمان خشک کردن را ۳۲٪ و ۵۳٪ کاهش داد [۹]. بودزاک و سروگا [۱۰] سینتیک دفع رطوبت از خمیر کروستلا^۲ را طی سرخ کردن در دماهای ۱۶۰، ۱۷۰، ۱۸۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. ضریب انتشار مؤثر رطوبت در ۶۰ ثانیه اول فرآیند در دماهای مذکور به ترتیب $۵/۸۳۷ \times 10^{-۹}$ ، $۶/۶۷ \times 10^{-۹}$ ، $۸/۴۷۲ \times 10^{-۹}$ و $۹/۷۲۸ \times 10^{-۹}$ مترمربع بر ثانیه بود. ترانکوزو و پدرسچی [۱۱]، مدل‌سازی دفع رطوبت

و جذب روغن در حین سرخ کردن عمیق تحت خلأ و فشار اتمسفری ورقه‌های سیب‌زمینی آنزیم‌بری و خشک‌شده را انجام دادند. در این مطالعه، برای مدل‌سازی دفع رطوبت، از قانون دوم فیک استفاده شد. مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت بین $۱/۸۰ \times 10^{-۹}$ - $۴/۷۳ \times 10^{-۹}$ مترمربع بر ثانیه گزارش شد. در پژوهشی دیگر، اثر امواج فراصوت در خشک کردن خربزه بررسی شد [۱۲]. در این مطالعه، خربزه‌ها تحت فرکانس ۲۸ کیلوهرتز و توان ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه قرار داده شدند. در این بررسی، امواج فراصوت باعث افزایش دفع رطوبت و کاهش زمان خشک کردن شد.

با توجه به افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت در نتیجه اعمال امواج فراصوت، می‌توان کاهش زمان سرخ کردن و بهبود ویژگی‌های ماده غذایی را انتظار داشت. همچنین، به دلیل ارتباط بین دفع رطوبت و جذب روغن، پیش‌بینی دفع رطوبت از طریق مدل‌های ریاضی به طراحی و کنترل بهینه شرایط فرآیند و در نتیجه کنترل کیفی محصول می‌انجامد [۱ و ۱۳]. نقوی و همکاران [۱۴]، تأثیر تلفیقی امواج فراصوت (در فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه) و خشک کردن (در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ و ۱۵ دقیقه)؛ رزاق‌پور [۱۵]، تأثیر تلفیقی امواج فراصوت (در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۲۰ و ۴۰ دقیقه) و آنزیم‌بری (با آب داغ در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ و ۴ دقیقه) و رونقی و دهقان‌نیا [۱۶]، تأثیر تلفیقی امواج فراصوت (در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه) و پوشش‌دهی (با غلظت ۰/۱ و ۰/۲٪ کربوکسی متیل سلولز) را در فرآیند سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی مورد بررسی قرار دادند. در تمامی این پژوهش‌ها، به کار بردن امواج فراصوت باعث تسریع دفع رطوبت محصول در حین فرآیند شد. این در حالی است که در هیچ‌کدام از این مطالعه‌ها، تأثیر فرکانس‌های مختلف امواج فراصوت به صورت ترکیب‌های زمانی متفاوت روی دفع رطوبت بررسی نشده است. با توجه به این که استفاده از فرکانس‌های مختلف به صورت ترکیب‌های زمانی متفاوت می‌تواند روی تشکیل کانال‌های میکروسکوپی توسط امواج فراصوت و در

1. Cavitation
2. Krostula

۲-۱- تجهیزات

در این پژوهش، از سرخ‌کن خانگی Mulinex (با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°C)، آون کنوکسیون (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 (مدل US-4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و همچنین زمان اولتراسونیکاسیون) استفاده شد.

۲-۲- تهیه نمونه‌ها

سیب‌زمینی‌ها بعد از شستشو پوست‌گیری شده و سپس قطعات سیب‌زمینی توسط کاتر دستی به ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 1/2$ cm، 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 پیش-تیمار صورت‌گرفته، نمونه‌ها به دسته‌های مختلف تقسیم گردیدند (جدول ۱).

نتیجه روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت مؤثر باشد، بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی روند دفع رطوبت طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی با استفاده از اعمال فرکانس‌های تلفیقی امواج فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به صورت مجزا و تلفیقی مجموعاً به مدت ۳۰ دقیقه)، تعیین زمان و فرکانس بهینه این امواج و همچنین مدل‌سازی دفع رطوبت بود.

۲- 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) بود.

Table 1 Different treatments and their abbreviations

Number	Treatments
1	Control
2	Ultrasound waves with a frequency of 28 kHz for 30 minutes (U1)
3	Ultrasound waves with a frequency of 40 kHz for 30 minutes (U2)
4	Ultrasound waves with a frequency of 28 kHz for 15 minutes - Ultrasound waves with a frequency of 40 kHz for 15 minutes (U3)
5	Ultrasound waves with a frequency of 28 kHz for 20 minutes - Ultrasound waves with a frequency of 40 kHz for 10 minutes (U4)
6	Ultrasound waves with a frequency of 28 kHz for 10 minutes - Ultrasound waves with a frequency of 40 kHz for 20 minutes (U5)

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 جذب، بلافاصله آنالیزهای مربوطه روی آن‌ها انجام گرفت. آزمایش‌ها در ۲ تکرار صورت گرفت.

۲-۳- 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،

۲-۴- محتوای روغن

میزان روغن نمونه‌های سرخ‌شده، به‌وسیله استخراج با حلال پترولیوم اتر در دستگاه سوکسله اندازه‌گیری شد [۱۷] و نتایج به شکل گرم روغن بر گرم ماده جامد خشک بدون روغن گزارش گردید.

۲-۵- محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها از طریق خشک‌کردن آنها در آون کنوکسیون با دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ تا رسیدن به وزن ثابت انجام گرفت [۱۷].

۲-۶- میزان چروکیدگی

اثر زمان سرخ‌کردن بر کاهش حجم محصول (چروکیدگی) به صورت زیر بیان شد [۱۸]:

$$[۱] \quad S_{(t)} = \frac{V_0 - V_t}{V_0}$$

در این رابطه، $S_{(t)}$: درصد چروکیدگی در لحظه t (بدون بعد)، V_0 : حجم اولیه ماده غذایی (cm^3) و V_t : حجم ماده غذایی در لحظه t (cm^3) می‌باشد.

۲-۷- دانسیته 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 ذیل دانسیته ظاهری به دست می‌آید [۱۱]:

$$[۲] \quad \rho_{\text{ap}} = \frac{M}{V}$$

در این رابطه، ρ_{ap} : دانسیته ظاهری (g/cm^3)، M : جرم ماده غذایی (g) و V : حجم ظاهری ماده غذایی (cm^3) می‌باشد.

حجم ظاهری با به‌کارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولون) با استفاده از پیکنومتر شیشه‌ای و مطابق فرمول ذیل محاسبه گردید [۱۴ و ۱۸]:

$$[۳] \quad V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho}$$

در این رابطه، 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) و ρ : دانسیته تولون (kg/m^3) می‌باشد.

۲-۸- مدل‌سازی دفع رطوبت

در این پژوهش، میزان دفع رطوبت بر اساس قانون انتشار فیک، طبق رابطه ۴ که به نام معادله کرنک^۳ شناخته می‌شود، محاسبه شد [۱۹]:

[۴]

$$M_t = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right)$$

در رابطه فوق، M_t : محتوای رطوبتی بدون بعد، m_t : محتوای رطوبتی در لحظه t (گرم آب / گرم ماده جامد خشک)، m_0 : محتوای رطوبتی اولیه (گرم آب / گرم ماده جامد خشک)، m_e : محتوای رطوبتی تعادلی (گرم آب / گرم ماده جامد خشک)، D_{eff} : ضریب انتشار موثر رطوبت (m^2/s)، t : زمان (s) و L : نصف ضخامت برش‌ها (m) می‌باشد.

علاوه بر این مدل، از ۸ مدل تجربی دیگر نیز استفاده شد (جدول ۲). برازش داده‌های تجربی حاصل از آزمایش با این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Maple15 (مدل کرنک) و MATLAB (Version 7.14.0.739, R2012a) (مدل ۹-۲) انجام شد. ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان معیار برازش مناسب مدل‌ها در نظر گرفته شدند.

Table 2 Dimensionless moisture ratio modeling of potato slices during frying process as a function of time (1-6) oil content (O), shrinkage (S) and apparent density (ρ) (7-9)

Number	Model	Reference
1	$M_t = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$	Crank [19]
2	$M = \exp(-a.t)$	Krokida et al. [20]
3	$M = a.t^2 + b.t + c$	Razzaghpour [15]
4	$M = a + \exp(bt)$	Ronaghi and Deghannya [16]
5	$M = \frac{1}{a.t + b}$	Naghavi et al. [14]
6	$M = \frac{t+a}{b.t+a}$	Naghavi et al. [14]
7	$M = a.\exp(b.O^\circ)$	Alizadeh [21]
8	$M = a.S^2 + b.S + c$	Alizadeh [21]
9	$M = a.\rho^2 + b.\rho + c$	Razzaghpour [15]

۳- نتایج و بحث

محتوای رطوبت اولیه نمونه‌های پیش‌تیمارشده در مقایسه با نمونه‌های شاهد بالاتر بود (جدول ۳). با توجه به غوطه‌وری نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام فراصوت و به دلیل گردیدن غلظت، انتقال رطوبت از حمام فراصوت به نمونه‌ها صورت گرفت [۲۳ و ۲۴]. همچنین، اعمال امواج فراصوت به مدت طولانی (۳۰ و ۴۰ دقیقه)، سبب تخریب ساختار شده و رطوبت جذب ماده غذایی می‌شود [۲۵]. افزایش محتوای رطوبت در تمامی نمونه‌های پیش‌تیمارشده نسبت به نمونه شاهد جز در نمونه‌هایی که با امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه تیمار شده بودند، غیرمعنی‌دار بود.

Table 3 Initial moisture content of different potato slices with various treatments

Treatment	Initial moisture content (Dry basis)
Control	3.29 ^b
U1	3.61 ^{ab}
U2	4.80 ^a
U3	3.75 ^{ab}
U4	3.73 ^{ab}
U5	3.85 ^{ab}

Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

۲-۹- اثر دما روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت

برای بررسی اثر دما روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت، از معادله آرنیوس استفاده شد [۲۲].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad [5]$$

در این رابطه، D_{eff} : ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s); D_0 : فاکتور پیش‌نمایی (m^2/s); E_a : انرژی فعال‌سازی (J/mol); R : ثابت جهانی گازها ($8.31441 J/mol K$) و T : دما (K) می‌باشد.

۲-۱۰- آنالیز آماری

جهت بررسی تأثیر تلفیقی فرکانس‌های مختلف امواج فراصوت روی دفع رطوبت، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی پیاده شد. ۶ تیمار نشان‌داده‌شده در جدول ۲ در سه دمای ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار ($6 \times 3 \times 4 \times 2 = 144$) سرخ شده و تأثیر هر کدام از پیش‌تیمارها روی دفع رطوبت آنالیز شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن^۴ در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) انجام شد.

۳-۱- تأثیر فرکانس‌های تلفیقی و زمان اعمال امواج فراصوت بر نسبت رطوبت، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی

شکل ۱، نسبت رطوبت بدون بعد قطع‌های سیب‌زمینی شاهد و پیش‌تیمار شده طی فرآیند سرخ‌کردن را در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها، سرعت دفع رطوبت در دماهای مختلف در زمان‌های ابتدایی فرآیند، بالا بود ولی پس از آن، نرخ تبخیر رطوبت کاهش پیدا کرد [۳، ۱۰، ۲۰ و ۲۶]. علاوه بر این، با توجه به شکل ۱ ملاحظه می‌شود که سرعت دفع رطوبت در همه نمونه‌های پیش‌تیمار شده با امواج فراصوت در مقایسه با نمونه‌های شاهد در تمامی دماهای سرخ‌کردن بیشتر بود [۲۳]. قطع‌های سیب‌زمینی که تحت تأثیر امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفته بودند، بیشترین دفع رطوبت را در بین همه نمونه‌ها از خود نشان دادند. نتایج این شکل حاکی از آن است که در سیب‌زمینی‌های پیش‌تیمار شده، زمان لازم برای رسیدن به یک محتوای رطوبت مشخص در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش یافته و این امر به دلیل تسریع در دفع رطوبت در نهایت منجر به کاهش جذب روغن در این نمونه‌ها می‌گردد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که افزایش دمای سرخ‌کردن سبب افزایش معنی‌دار ضریب انتشار مؤثر رطوبت شد [۱، ۳، ۱۸ و ۲۷]. ضریب انتشار مؤثر رطوبت به عواملی نظیر محتوای رطوبت، دمای فرآیند و ساختار ماده غذایی، نسبت خلل و فرج و همچنین ساختار و توزیع منافذ بستگی دارد [۲۸]. با افزایش دما سرخ‌کردن، دمای بخار آب افزایش می‌یابد و این امر منجر به تسهیل دفع رطوبت و افزایش این ضریب می‌شود؛ ولی از طرف دیگر، دماهای بالاتر سبب تشکیل پوسته سفت و سخت می‌شود و به طبع آن ضریب انتشار مؤثر رطوبت کاهش می‌یابد. در این پژوهش، اثر دمای بخار آب بر اثر مقاومت پوسته خارجی در برابر دفع رطوبت غالب بود [۳]. ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل از داده‌های آزمایشی بین $1/823 \times 10^{-8}$ و $4/377 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه متغیر بود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). برخی از پژوهش‌گران، ضریب انتشار مؤثر رطوبت را برای سیب‌زمینی، هویج، پیاز و لعل سبز بین 10^{-8} تا 2×10^{-8} مترمربع بر ثانیه

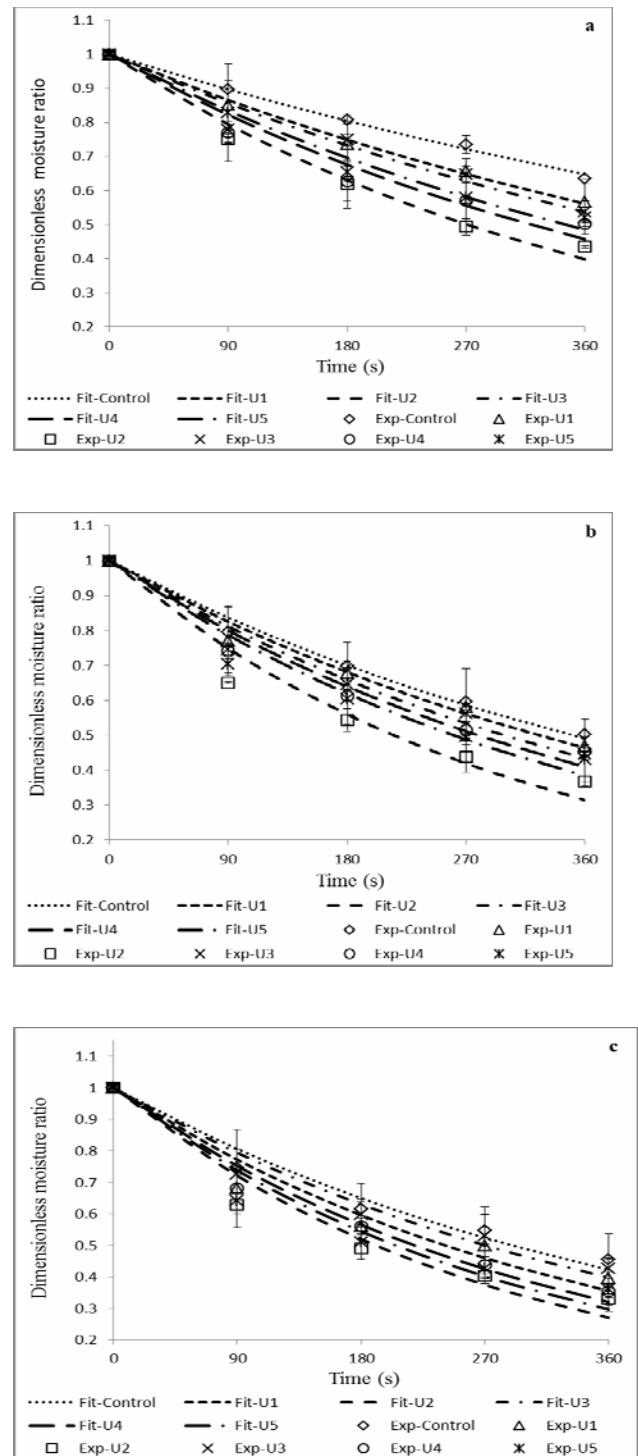


Figure 1 Dimensionless moisture ratio of potato slices based on experimental (Exp) and predicted (Fit) data (model 2, Table 2) at 150°C (a), 170°C (b) and 190°C (c)

۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد را بین $6/1 \times 10^{-8}$ و $3/89 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه گزارش کردند.

گزارش کرده‌اند [۲۸]. رونقی و دهقان‌نیا [۱۶] ضریب انتشار مؤثر رطوبت را برای سیب‌زمینی‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت و پوشش‌های خوراکی و سپس سرخ‌شده در دماهای

Table 4 Comparison of mean effective moisture diffusion coefficient at different temperatures and with different pretreatments during frying

Temperature (°C)	150	170	190			
$D_{eff} \times 10^{-8} (m^2/s)$	2.54114 ^c	3.18554 ^b	3.72051 ^a			
Treatment	Control	U1	U2	U3	U4	U5
$D_{eff} \times 10^{-3} (m^2/s)$	2.55329 ^c	2.89373 ^{bc}	3.89074 ^a	2.89373 ^{bc}	3.33144 ^{ab}	3.33144 ^{ab}

Different letters in each row indicate significant difference ($p < 0.05$).

فراصوت با فرکانس‌های پایین‌تر، کانال‌های ریز اندکی در ماده غذایی به وجود می‌آورند. بنابراین، امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در مقایسه با امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز در زمان ثابت ۳۰ دقیقه (به ترتیب، پیش‌تیمارهای U1 و U2)، باعث افزایش بیشتر ضریب انتشار مؤثر رطوبت شد. استفاده از هر دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه (پیش‌تیمار U3)، اثر معنی‌داری روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت نداشت. علت این امر، احتمالاً به دلیل تشکیل ناکافی کانال‌های ریز در ماده غذایی باشد. استفاده از امواج فراصوت در زمان‌های طولانی سبب تخریب ساختار سلولی ماده غذایی شده و کانال‌های ریز متعددی در ماده غذایی به وجود می‌آورند [۳۳].

با بررسی کلی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت به صورت مجزا و تلفیقی ملاحظه می‌شود که استفاده از امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ و ۳۰ دقیقه، اثر قابل توجهی روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت ندارد؛ اما استفاده از این امواج به مدت ۲۰ دقیقه (U4) نتیجه بهتری در افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل کرد. 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. این یافته‌ها در تطابق با نتایج حاصل از پژوهش فرناندز و همکاران [۸] می‌باشد. پژوهش‌گران مذکور از امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار در خشک‌کردن آناناس استفاده نمودند. در این پژوهش، قطعات آناناس تحت امواج

همچنین، جدول ۴، مقایسه میانگین ضریب انتشار مؤثر رطوبت را در نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمارشده نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس امواج فراصوت از ۲۸ به ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه (به ترتیب، پیش‌تیمارهای U1 و U2)، ضریب انتشار مؤثر رطوبت به طور معنی‌داری افزایش یافت [۲۹]. ضریب انتشار مؤثر رطوبت در تمام پیش‌تیمارهای تلفیقی نیز افزایش پیدا کرد؛ به طوری که این افزایش در دو پیش‌تیمار U4 و U5 معنی‌دار بود. با توجه به نتایج، بالاترین ضریب انتشار مؤثر رطوبت به ترتیب مربوط به پیش‌تیمارهای U2، U4 و U5 بود. امواج فراصوت از طریق پدیده حفره‌زایی^۵ با ایجاد اثر اسفنجی^۶ که سبب انبساط و انقباض‌های متوالی می‌شود، کانال‌های ریز میکروسکوپی در ماده غذایی به وجود می‌آورند و این امر سبب سهولت دفع رطوبت می‌شود. [۳۰-۳۲]. علاوه بر این، تغییرات ویسکوزیته، کشش سطحی و تغییر شکل ماده جامد متخلخل به تسریع دفع رطوبت کمک می‌کند [۹ و ۱۲].

سرعت حفره‌زایی یا انبساط و انقباض‌های متوالی به فرکانس امواج فراصوت وابسته است. احتمالاً نیروهای درگیر در این مکانیسم فیزیکی در فرکانس‌های بالاتر در مقایسه با فرکانس‌های پایین‌تر با قدرت بیشتری وارد عمل شده و بر نیروی کشش سطحی که سبب حفظ رطوبت داخل ماده غذایی می‌شود، غلبه می‌کنند. تصاویر میکروسکوپی حاصل از پژوهش شمایی و همکاران [۳۳] بیانگر این واقعیت است که استفاده از امواج

5. Cavitation
6. Sponge effect

انتشار مؤثر رطوبت در نتیجه به‌کار بردن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه امواج فراصوت به ترتیب برابر $9/08 \times 10^{-9}$ ، $1/38 \times 10^{-8}$ و $1/22 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه بود.

فراصوت با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه قرار گرفتند. استفاده از امواج فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه در مقایسه با مدت ۱۰ و ۳۰ دقیقه، تأثیر بیشتری در افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و کاهش زمان دفع رطوبت داشت. ضریب

Table 5 Effective moisture diffusion coefficients obtained from Fick's diffusion model for different treatments and temperatures during frying

Model 1	Temperature (°C)					
	150		170		190	
Treatment	$D_{\text{eff}} \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2	$D_{\text{eff}} \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2	$D_{\text{eff}} \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2
Control	$1.568 \pm 3.64E-10^f$	0.9375	$2.480 \pm 4.37E-09^{ef}$	0.9849	$3.063 \pm 5.83E-09^{bcde}$	0.9974
U1	$2.115 \pm 2.18E-09^{ef}$	0.9706	$2.699 \pm 3.67E-09^{def}$	0.9859	$3.720 \pm 8.02E-09^{abcd}$	0.9957
U2	$3.136 \pm 7.29E-10^{bcde}$	0.9927	$4.012 \pm 7.29E-10^{abc}$	0.9973	$4.595 \pm 2.18E-09^a$	0.9972
U3	$2.115 \pm 7.29E-10^{ef}$	0.9661	$2.918 \pm 1.45E-09^{cde}$	0.9919	3.209 ± 0^{bcde}	0.9974
U4	$2.626 \pm 1.45E-09^{def}$	0.9950	$3.136 \pm 2.18E-09^{bcde}$	0.9983	$3.939 \pm 1.45E-09^{abc}$	0.9985
U5	$2.480 \pm 4.37E-09^{ef}$	0.9739	$3.282 \pm 3.64E-09^{bcde}$	0.9987	$4.231 \pm 4.37E-09^{ab}$	0.9956

Different letters in each column indicate significant difference ($p < 0.05$).

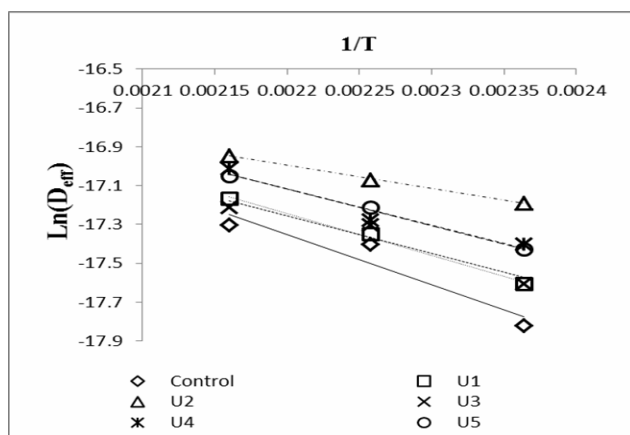


Figure 2 Logarithmic changes of effective moisture diffusion coefficient as a function of inverse absolute temperature for different treatments

میزان انرژی فعال‌سازی وابسته به محتوای رطوبت ماده غذایی می‌باشد؛ به طوری که در محتوای رطوبت پایین‌تر، میزان انرژی فعال‌سازی مورد نیاز جهت دفع رطوبت از ماده غذایی طی سرخ‌کردن، افزایش می‌یابد [۱۱]. به طوری که در زمان‌های ابتدایی فرآیند سرخ‌کردن به دلیل وجود رطوبت کافی در مرکز ماده غذایی، انرژی فعال‌سازی مورد نیاز پایین است؛ ولی با گذشت زمان و کاهش آهنگ دفع رطوبت از ماده غذایی، انرژی فعال‌سازی افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که ضریب انتشار مؤثر رطوبت در نمونه‌هایی که دارای انرژی فعال‌سازی بالاتری هستند،

بسیاری از پژوهش‌گران از معادله آرنیوس برای بررسی سینتیک سرخ‌کردن استفاده کرده‌اند که به‌طور رضایت‌بخشی اثر دما روی سرعت واکنش را توجیه کرده است [۳۴]. شکل ۲، منحنی تغییرات لگاریتم ضریب انتشار مؤثر رطوبت را به صورت تابعی از عکس دمای مطلق^۷ بر طبق معادله آرنیوس برای تیمارهای مختلف با ضریب تبیین بالای ۰/۹۶ نشان می‌دهد. انرژی فعال‌سازی حاصل از داده‌های آزمایشی برای سبب‌زمینی‌های شاهد، ۲۰/۸۵- کیلوژول بر مول بود. بودزاکي و سروگا [۱۰]، مقدار انرژی فعال‌سازی طی سرخ‌کردن خمیر کروستلا را ۳۰- کیلوژول بر مول گزارش کردند. همچنین، کابا و همکاران [۳۵] مقدار انرژی فعال‌سازی طی خشک‌کردن قطعات سیب قرمز را در دماهای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد با سرعت هوای ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ متر بر ثانیه بین ۱۹/۹۲- و ۲۲/۶۲- کیلوژول بر مول بیان کردند. براوو و همکاران [۱] نیز، مقدار انرژی فعال‌سازی برای قطعات سیب طی سرخ‌کردن عمیق در دماهای ۱۴۰، ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد را ۲۴/۵- کیلوژول بر مول گزارش کردند.

7. $\ln D_{\text{eff}} - 1/T \text{ (K)}$

دفع رطوبت از قطعات سیبزمینی کاهش پیدا می‌کند [۱۶] و [۲۰]. نمونه‌هایی که تحت پیش‌تیمار امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفته بودند، به دلیل داشتن ضریب انتشار مؤثر رطوبت بالاتر در مقایسه با سایر تیمارها، کمترین انرژی فعال‌سازی را از خود نشان دادند.

حساسیت بیشتری به دمای سرخ‌کردن دارند [۱۱ و ۳۶]. مطابق جدول ۶، انرژی فعال‌سازی نمونه‌های پیش‌تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد پایین‌تر است. پیش‌تیمار امواج فراصوت با ایجاد کانال‌های ریز در ساختار ماده غذایی سبب افزایش آهنگ دفع رطوبت از ماده غذایی و در نتیجه افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شده و در نهایت مقدار انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای

Table 6 Pre-exponential factor and activation energy values for effective moisture diffusion coefficient during frying

Treatment	$D_{eff} (m^2/s)$		R^2
	$D_0 \times 10^{-6} (m^2/s)$	Ea (kJ/mol)	
Control	7.79132	-20.8515	0.90
U1	3.49387	-17.694	0.96
U2	5.63274	-9.8455	0.94
U3	2.33733	-16.1946	0.91
U4	2.32335	-15.6529	0.94
U5	3.93736	-15.3002	0.94

Table 7 Statistical parameters obtained from models 2-9 in Table 2 for different treatments and temperatures during frying

Model 2	T (°C)					
	150		170		190	
Treatment	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0.9959	0.0090	0.9873	0.0216	0.9658	0.0391
U1	0.9960	0.0107	0.9791	0.0219	0.9409	0.0565
U2	0.9834	0.0209	0.9461	0.0546	0.9518	0.0581
U3	0.9438	0.0407	0.9692	0.0367	0.9621	0.0429
U4	0.9530	0.0428	0.9669	0.0393	0.9748	0.0401
U5	0.9793	0.0282	0.9527	0.0485	0.9398	0.0620

Table 7 (Continued)

Model 3	T (°C)					
	150		170		190	
Treatment	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0.9976	0.0097	0.9922	0.0239	0.9886	0.0319
U1	0.9979	0.0110	0.9841	0.0359	0.9723	0.0547
U2	0.9967	0.0182	0.9779	0.0521	0.9824	0.0496
U3	0.9535	0.0524	0.9796	0.0424	0.9830	0.0406
U4	0.9925	0.0241	0.9945	0.0227	0.9866	0.0414
U5	0.9964	0.0166	0.9839	0.04013	0.9816	0.0485

Table 7 (Continued)

Model 4	T (°C)					
	150		170		190	
Treatment	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0.9960	0.0103	0.9901	0.0220	0.9722	0.0407
U1	0.9968	0.0110	0.9831	0.0302	0.9503	0.0598
U2	0.9859	0.0309	0.9532	0.0619	0.956	0.0641
U3	0.9534	0.0428	0.9752	0.0381	0.9689	0.0449
U4	0.9615	0.0447	0.9728	0.0412	0.9781	0.0431
U5	0.9806	0.0316	0.9611	0.0508	0.9464	0.0675

Table 7 (Continued)

Model 5		T (°C)				
	150		170		190	
Treatment	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Control	0.9887	0.0179	0.9949	0.0157	0.9951	0.0170
U1	0.9974	0.0099	0.9890	0.0243	0.9869	0.0307
U2	0.9983	0.0106	0.9919	0.0258	0.9968	0.0172
U3	0.9600	0.0397	0.9887	0.0257	0.9929	0.0215
U4	0.9908	0.0218	0.9976	0.0122	0.9958	0.0189
U5	0.9928	0.0192	0.9917	0.0235	0.9933	0.0239

Table 7 (Continued)

Model 6		T (°C)				
	150		170		190	
Treatment	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Control	0.9787	0.0237	0.9902	0.0220	0.9946	0.0179
U1	0.9919	0.0176	0.9810	0.0320	0.9925	0.0232
U2	0.9946	0.0191	0.9956	0.0190	0.9989	0.0102
U3	0.9585	0.0404	0.9841	0.0305	0.9945	0.0188
U4	0.9976	0.0111	0.9976	0.0123	0.9904	0.0285
U5	0.9911	0.0214	0.9955	0.0172	0.9991	0.0088

Table 7 (Continued)

Model 7		T (°C)				
	150		170		190	
Treatment	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Control	0.9363	0.0504	0.9908	0.0260	0.9775	0.0448
U1	0.9559	0.0502	0.9977	0.0136	0.9960	0.0207
U2	0.9967	0.0183	0.9975	0.0176	0.9931	0.0311
U3	0.9892	0.0253	0.9595	0.0597	0.9586	0.0634
U4	0.9811	0.0383	0.9931	0.0253	0.9583	0.0729
U5	0.9792	0.0401	0.9959	0.0202	0.9856	0.0429

Table 7 (Continued)

Model 8		T (°C)				
	150		170		190	
Treatment	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Control	0.9681	0.0357	0.9981	0.0118	0.9949	0.0214
U1	0.9826	0.0315	0.9813	0.0389	0.9771	0.0497
U2	0.9997	0.0052	0.9825	0.0463	0.9854	0.0452
U3	0.9581	0.0497	0.9940	0.0071	0.9934	0.0253
U4	0.9897	0.0283	0.9897	0.0311	0.9909	0.0341
U5	0.9585	0.0566	0.9958	0.0205	0.9983	0.0146

Table 7 (Continued)

Model 9		T (°C)				
	150		170		190	
Treatment	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Control	0.9963	0.0085	0.9900	0.0274	0.9644	0.0565
U1	0.9702	0.0412	0.9997	0.0047	0.9988	0.0116
U2	0.8913	0.1053	0.8816	0.1207	0.9757	0.0584
U3	0.8912	0.0802	0.9930	0.0249	0.9621	0.0429
U4	0.9578	0.0573	0.9942	0.0233	0.9890	0.0373
U5	0.9936	0.0222	0.9466	0.730	0.9553	0.0755

حائز اهمیت می‌باشد. در واقع، بخار آب خروجی از ماده غذایی حین سرخ‌کردن، با ایجاد منافذ و فضاهای خالی در ماده غذایی فضای لازم برای ورود بعدی روغن را فراهم می‌آورد. بنابراین، با دفع رطوبت بیشتر، جذب روغن بیشتر افزایش می‌یابد [۱۸]. همچنین، در حین فرآیند سرخ‌کردن با افزودن ماده غذایی به روغن داغ، دمای سطحی ماده غذایی افزایش یافته و آب موجود در سطح ماده غذایی شروع به جوشیدن می‌کند و به علت تبخیر، سطح ماده غذایی خشک شده و چروکیدگی سطحی اتفاق می‌افتد [۳۷]. علاوه بر موارد ذکر شده، طی سرخ‌کردن، میزان دانسیته ظاهری کاهش می‌یابد که این امر به دلیل دفع رطوبت و جذب روغن نمونه‌ها می‌باشد [۱۸]. بنابراین، مدل‌سازی نسبت رطوبت بدون بعد به صورت تابعی از چروکیدگی و دانسیته ظاهری می‌تواند به کنترل بهتر این فرآیند با هدف بهبود کیفی ماده غذایی سرخ‌شده کمک نماید.

جدول ۸، مدل‌سازی ضرایب مدل‌های نسبت رطوبت بدون بعد را به صورت تابعی از فرکانس، زمان اعمال فرکانس و دمای سرخ‌کردن نشان می‌دهد که از طریق رگرسیون چندمتغیره به دست آمده‌اند. با داشتن چنین معادله‌هایی می‌توان به راحتی میزان رطوبت محصول را در هر لحظه از فرآیند با توجه به متغیرهای مذکور پیش‌بینی کرد.

۲-۳- مدل‌سازی نسبت رطوبت بدون بعد در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فرکانس‌های تلفیقی امواج فراصوت در زمان‌های مختلف و معتبرسازی آن

شکل ۱، علاوه بر نسبت رطوبت بدون بعد حاصل از داده‌های آزمایشی، نسبت رطوبت بدون بعد برازش‌شده با مدل ۲ جدول ۲ را نیز در تیمارهای مختلف و در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. تطابق مناسبی بین داده‌های آزمایشی و داده‌های حاصل از مدل‌های مختلف جدول ۲ وجود داشت (جدول ۷). به عبارت دیگر، تمامی مدل‌ها با داشتن پارامترهای آماری مناسب به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش کردند. مدل‌های ۲ تا ۹ به ترتیب و به‌طور میانگین دارای ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۶۵، ۰/۹۸۵، ۰/۹۷۱، ۰/۹۹۱، ۰/۹۹۰، ۰/۹۹۵، ۰/۹۸۰ و ۰/۹۸۵ بودند.

مدل‌های ۹-۷ به ترتیب بیانگر مدل‌های نسبت رطوبت بدون بعد به صورت تابعی از محتوای روغن، چروکیدگی و دانسیته ظاهری می‌باشد. همانگونه که ذکر شد، دفع رطوبت و جذب روغن دو پدیده کاملاً مرتبط با هم هستند. بنابراین، مدل‌سازی میزان دفع رطوبت در حین سرخ‌کردن به صورت تابعی از محتوای روغن

Table 8 Multivariate models for constants of models 2-6 in Table 2 according to process conditions

Model coefficients $M = \exp(-a \cdot t)$	R^2
$a = 5.84E - 05F_{u1} - 4.9E - 05t_1 - 1.6E - 05F_{u2} + 7.4E - 06t_2 + 1.18E - 05T$	0.968
Model coefficients $M = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$	R^2
$a = 1.12E - 07F_{u1} - 1.2E - 07t_1 - 4E - 08F_{u2} + 4.16E - 08t_2 + 1.58E - 08T$	0.904
$b = -5.8E - 05F_{u1} + 5.31E - 05t_1 + 1.98E - 05F_{u2} - 1.7E - 05t_2 - 1.3E - 05T$	0.965
$c = -0.00023F_{u1} + 0.001856t_1 - 3.9E - 05F_{u2} + 0.001513t_2 + 0.005538T$	0.991
Model coefficients $M = a + \exp(bt)$	R^2
$a = -0.00013F_{u1} + 0.000369t_1 - 1.2E - 05F_{u2} - 0.00096t_2 + 7.97E - 05T - 1.1E - 06T^2$	0.905
$b = -4.7E - 05F_{u1} + 5.22E - 05t_1 + 8.67E - 06F_{u2} - 9.4E - 06t_2 - 1.1E - 05T$	0.979
Model coefficients $M = \frac{1}{a \cdot t + b}$	R^2
$a = 0.000111F_{u1} - 1E - 04t_1 - 3E - 05F_{u2} + 8.26E - 06t_2 + 1.63E - 05T$	0.949
$b = -0.00011F_{u1} + 0.001853t_1 + 4.72E - 05F_{u2} + 0.002186t_2 + 0.005574T$	0.991
Model coefficients $M = \frac{t + a}{b \cdot t + a}$	R^2
$a = -33.1436F_{u1} + 34.31542t_1 - 3.71789F_{u2} + 0.458755t_2 + 33.38734T - 0.13003T^2$	0.852
$b = 0.101248F_{u1} + 0.245969t_1 + 0.169453F_{u2} + 0.245969t_2 + 0.031261T + 0.000171T^2$	0.943

F_{u1} , F_{u2} , t_1 , t_2 , T correspond to initial frequency, secondary frequency, duration of initial frequency and frying temperature, respectively. Both U1 and U2 pretreatments were considered as two 15 min periods.

تجزیه تحلیل رگرسیون چندمتغیره مدل‌هایی بر حسب دما و زمان سرخ‌کردن و همچنین فرکانس و زمان امواج فراصوت پیشنهاد گردید.

۵- منابع

- [1] Bravo, J., Sanjuán, N., Ruales, J., & Mulet, A., (2009), Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying, *Drying Technology*, 27(6), p. 782-786.
- [2] Farinu, A. and O.-D. Baik., (2007), Heat transfer coefficients during deep fat frying of sweetpotato: Effects of product size and oil temperature, *Food Research International*, 40(8), p. 989-994.
- [3]. Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C., & Moyano, P., (2005), Modeling water loss during frying of potato slices, *International Journal of Food Properties*, 8(2), p. 289-299.
- [4]. Moyano, P. C. and A. Z. Berna., (2002), Modeling water loss during frying of potato strips: effect of solute impregnation, *Drying Technology*, 20(7), p. 1303-1318.
- [5]. Debnath, S., Bhat, K., & Rastogi, N., (2003), Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food, *LWT-Food Science and Technology*, 36(1), p. 91-98.
- [6]. Tao, Y. and D.-W. Sun., (2015), Enhancement of food processes by ultrasound: a review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55, p. 570-594.
- [7]. Fernandes, F. A., Oliveira, F. I., & Rodrigues, S., (2008), Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana, *Journal of Food Engineering*, 82(2), p. 261-267.
- [8]. Fernandes, F. A., Gallão, M. I., & Rodrigues, S., (2009), Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration, *Journal of Food Engineering*, 90(2), p. 186-190.
- [9]. García-Pérez, J., Cárcel, J., De la Fuente-Blanco, S., & Riera-Franco de Sarabia, E., (2006), Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study, *Ultrasonics*, 44, p. e539-e543.

به‌منظور معتبرسازی مدل (مدل ۲ جدول ۲)، 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 درجه‌سانتی‌گراد به مدت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ‌شدند. نتایج حاصل از برازش مقادیر نسبت رطوبت حاصل از آزمایش با مقادیر نسبت رطوبت پیش‌بینی‌شده با مدل ۲ جدول ۲ در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل، انطباق مناسبی بین داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از مدل وجود داشت ($R^2 = 0.9986$).

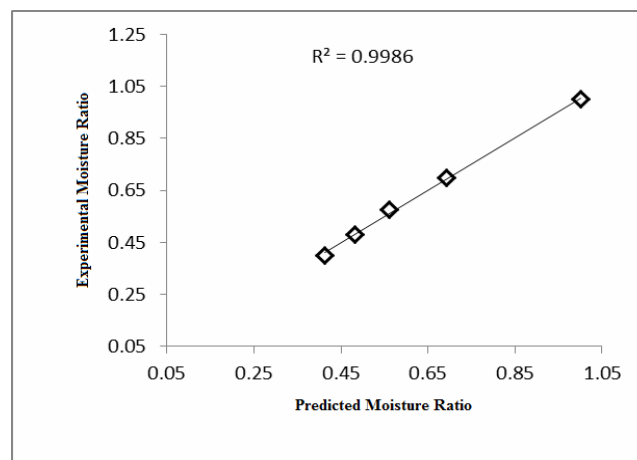


Figure 3 Linear fit between experimental and predicted moisture ratio (model 2, Table 2)

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری امواج فراصوت می‌تواند به عنوان یک روش مناسب در بهبود ویژگی‌های کیفی سیب‌زمینی که در نهایت منجر به تولید محصولی با محتوای روغن پایین می‌شود، در نظر گرفته شود. امواج فراصوت سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و کاهش نسبت رطوبت بدون بعد و انرژی فعال‌سازی شد. امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه به صورت تنها و همچنین فرکانس تلفیقی ۲۸ کیلوهرتز (به مدت ۲۰ دقیقه) و ۴۰ کیلوهرتز (به مدت ۱۰ دقیقه) به همراه فرکانس تلفیقی ۲۸ کیلوهرتز (به مدت ۱۰ دقیقه) و ۴۰ کیلوهرتز (به مدت ۲۰ دقیقه) بهترین عملکرد را در افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت طی سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی از خود نشان دادند. مدل‌های استفاده‌شده به خوبی داده‌های آزمایشی محتوای رطوبت را برازش کردند. با استفاده از

- edible coatings, M. Sc. Thesis (In Persian), University of Tabriz, Tabriz.
- [22]. Crank, J., & Gupta, R. S., (1975), Isotherm migration method in two dimensions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(9), p. 1101-1107.
- [23]. 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), p. 427-433.
- [24]. Azoubel, P. M., Baima, M. d. A. M., Amorim, M. d. R., & Oliveira, S. S. B., (2010), Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics, *Journal of food Engineering*, 97(2), p. 194-198.
- [25]. 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), p. 294-303.
- [26]. Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., & Raoult-Wack, A.-L., (2002), Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53(2), p. 161-176.
- [27]. Panagiotou, N., Krokida, M., Maroulis, Z., & Saravacos, G., (2004), Moisture diffusivity: literature data compilation for foodstuffs, *International Journal of Food Properties*, 7(2), p. 273-299.
- [28]. Maroulis, Z., Saravacos, G., Panagiotou, N., & Krokida, M., (2001), Moisture diffusivity data compilation for foodstuffs: effect of material moisture content and temperature, *International Journal of Food Properties*, 4(2), p. 225-237.
- [29]. Simal, S., Bedito, J., Sánchez, E. S., & Rosselló, C., (1998), Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration, *Journal of Food Engineering*, 36(3), p. 323-336.
- [30]. Mulet, A., Carcel, J., Sanjuan, N., & Bon, J., (2003), New food drying technologies-Use of ultrasound, *Food Science and Technology International*, 9(3), p. 215-221.
- [31]. Sun, D.-W., (2005), Emerging technologies for food processing, Academic press.
- [10]. Budžaki, S. and B. Šeruga., (2005), Moisture loss and oil uptake during deep fat frying of “Kroštula” dough, *European Food Research and Technology*, 220(1), p. 90-95.
- [11]. Troncoso, E. and F. Pedreschi., (2009), Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices, *LWT-Food Science and Technology*, 42(6), p. 1164-1173.
- [12]. Rodrigues, S. and F. A. Fernandes., (2007), Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons, *Drying Technology*, 25(10), p. 1791-1796.
- [13]. Costa, R. and F. Oliveira., (1999), Modelling the kinetics of water loss during potato frying with a compartmental dynamic model, *Journal of Food Engineering*, 41(3), p. 177-185.
- [14]. Naghavi, E, Dehghannya, J & Ghanbarzadeh, B., (2013), Kinetic modeling of moisture loss during deep-fat frying of potato strips pretreated with ultrasound and drying, *Innovative Food science and Technologies*, 1(3), p. 49-68 (In Persian).
- [15]. Razaghpour, E., (2013), Modeling oil uptake and moisture loss during deep-fat frying of potato slices pretreated with blanching and ultrasound, M. Sc. Thesis (In Persian), University of Tabriz, Tabriz.
- [16]. Ronaghi, T. & Dehghannya, J., (2013), Kinetic modeling of water loss in potato slices pretreated with ultrasound and edible coating during deep-fat frying process, *Journal of Food Research*, 23(3), p. 21-36 (In Persian).
- [17]. AOAC., (1995), Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists, Association of Official Analytical Chemists.
- [18]. Ziaifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G., (2010), Porosity development and its effect on oil uptake during frying process, *Journal of Food Process Engineering*, 33(2), p. 191-212.
- [19]. Crank, J., (1979), The Mathematics of Diffusion, Oxford, Oxford University Press.
- [20]. Krokida, M., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z., (2000), Water loss and oil uptake as a function of frying time, *Journal of Food Engineering*, 44(1), p. 39-46.
- [21]. Alizadeh, Z, S., Evaluation of mass transfer phenomena during deep-fat frying of potato slices pretreated with blanching and

- Reviews in Food Science and Nutrition, 46(3), p. 239-258.
- [35] Kaya, A., Aydın, O., & Demirtaş, C., (2007), Drying kinetics of red delicious apple, Biosystems Engineering, 96(4), p. 517-524.
- [36] Manjunatha, S., Ravi, N., Negi, P., Raju, P., & Bawa, A., (2012), Kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of Gethi (*Dioscorea kamoensis* Kunth) strips, Journal of Food Science and Technology, p. 1-11.
- [37] Mellema, M., (2003), Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods, Trends in Food Science & Technology, 14(9), p. 364-373.
- [32] De la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J., (2006), Food drying process by power ultrasound, Ultrasonics, 44, p. e523-e527.
- [33] Shamaei, S., Emamjomeh, 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), p. 133-141.
- [34] Hindra, F. and O.-D. Baik., (2006), Kinetics of quality changes during food frying, Critical

Influence of combined frequencies and various applied time combinations of ultrasound waves on moisture loss during frying of potato strips

Mohammadalinejad, S.¹, dehghannya, J.^{2*}, Jalali, S. H.³

1. M. Sc. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
3. Lecturer, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(Received: 93/9/20 Accepted: 93/11/19)

Moisture loss and oil uptake are closely related during the process of deep-fat frying. The aim of this study was to evaluate the influence of ultrasound waves with combined frequencies on moisture loss kinetics during frying of potato strips as well as modeling the moisture loss. Ultrasound pretreatment was performed at 28 and 40 kHz for 30 minutes with separate and combined frequencies. Then, the frying process was done at 150, 170 and 190°C for 90, 180, 270 and 360 seconds. To model moisture loss, Fick's second law was used. Effective moisture diffusion coefficient obtained from experimental data was between 1.823×10^{-8} - 4.377×10^{-8} m²/s. The average correlation coefficient between the experimental data and the data obtained from the Fick's law was 0.96. The use of ultrasonic pretreatment with separate and combined frequencies increased the effective moisture diffusion coefficient. This increase was significant in some samples while it was insignificant in others. Empirical models were used to study the moisture loss kinetics during frying. In addition, effect of temperature on the effective moisture diffusion coefficient was calculated through the Arrhenius equation.

Keywords: Frying, Effective moisture diffusion coefficient, Ultrasound, Modeling

* Corresponding Author E-Mail Address: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir