

مدل سازی سینتیک دفع رطوبت طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند و آبگیری اسمزی

جلال دهقان نیا^{۱*}، لیدا عابدپور^۲

۱- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۱۳)

چکیده

سرخ کردن عمیق یکی از روش های فرآوری سیب زمینی است که برای ایجاد عطر، طعم، رنگ و بافت مطلوب در مواد غذایی فرآوری شده، انتخاب می شود. هدف از این پژوهش، بررسی سینتیک دفع رطوبت در نمونه های سیب زمینی سرخ شده و مدل سازی انتقال رطوبت در این نمونه ها با استفاده از پیش تیمارهای اولتراسوند در دو سطح فرکانس ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و آبگیری اسمزی در محلول نمک با غلظت های ۲ و ۴٪ بود. در این مطالعه، از قانون فیک به عنوان یکی از مدل های انتقال رطوبت استفاده گردید و مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت به دست آمده مابین $1/945 \times 10^{-8}$ و $7/178 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه با میانگین ضریب همبستگی ۰/۹۴۸ بود. هر دو پیش تیمار مورد استفاده باعث افزایش میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت طی سرخ کردن قطعات سیب زمینی شدند. علاوه بر مدل فیک، از ۶ مدل تجربی نیز برای مدل سازی انتقال رطوبت استفاده گردید. همچنین، استفاده از رابطه آرنیوس به منظور بررسی تأثیر دما بر میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت نشان داد که افزایش دما منجر به افزایش این ضریب طی فرآیند سرخ کردن می گردد.

کلید واژگان: سرخ کردن، انتقال جرم، دفع رطوبت، زمان فرآیند، ضریب انتشار مؤثر رطوبت

*مسئول مکاتبات: J_deghannya@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

سیب‌زمینی یک غده خوراکی نشاسته‌ای با نام علمی *Solanum tuberosum* توروزوم^۱ می‌باشد و به صورت پخته شده، کبابی و سرخ شده مورد مصرف قرار می‌گیرد [۱]. سرخ کردن عمیق، یک فرآیند پخت سریع مواد غذایی می‌باشد و اغلب به عنوان روشی برای ایجاد عطر، طعم، رنگ و بافت یکنواخت در مواد غذایی فرآوری شده انتخاب می‌شود [۲، ۳]. سرخ کردن عمیق شامل چندین سازوکار همزمان، از جمله انتقال جرم و حرارت می‌باشد. در فرآیند سرخ کردن عمیق، دو انتقال جرم عمده صورت می‌گیرد: انتقال رطوبت و انتقال روغن. انتقال حرارت در این فرآیند موجب می‌شود که رطوبت داخل ماده غذایی به سطح محصول مهاجرت کرده و سپساز سطح تبخیر شود و بصورت همزمان، روغن به داخل محصول نفوذ کند. بانگا و همکاران [۴] بیان کردند که برای بهینه‌سازی و کنترل فرآیند، یک شبیه‌سازی قابل اعتماد از فرآیند با استفاده از مدل ریاضی ضروری می‌باشد. در منابع مختلف، چندین مدل برای تشریح مشخصات دفع رطوبت در محصولات بیولوژیکی ارائه شده است. اشکنازی و همکاران [۵] بیان کردند که انتشار رطوبت حین سرخ کردن خلال سیب‌زمینی با ریشه دوم زمان سرخ کردن متناسب می‌باشد. گمبل و همکاران [۶] مدل اشکنازی و همکاران [۲] را برای تشریح آهنگ خشک شدن چپیس سیب‌زمینی در سرخ کردن عمیق به کار بردند. علاوه بر این، کوزمیل و همکاران [۷] قانون انتشار فیک را برای مدل‌سازی دفع رطوبت مورد استفاده قرار دادند. همچنین، موریرا و همکاران [۸] نیز مدل انتشار را برای پیش‌بینی دفع رطوبت در مورد چپیس تورتیلا حین سرخ کردن عمیق استفاده کردند.

طی دهه‌های اخیر استفاده از امواج اولتراسوند^۲ در فرآیندهای صنایع غذایی با هدف بهینه‌سازی فرآیند و بهبود کیفیت ماده غذایی مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات مختلفی در زمینه استفاده از پیش‌ تیمار اولتراسوند در فرآیند خشک کردن انجام گرفته است [۹-۱۱]. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان داده‌اند که استفاده از پیش‌ تیمار اولتراسوند موجب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش چروکیدگی و بهبود خصوصیات ظاهری و حسی ماده خشک شده می‌گردد. دلیل این امر به شکل‌گیری کانال‌های میکروسکوپی در ماده غذایی در اثر

انقباض و انبساط‌های متوالی ایجاد شده توسط امواج اولتراسوند نسبت داده می‌شود که باعث تسهیل خروج رطوبت از ماده غذایی می‌گردد [۱۰]. با این وجود، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه استفاده از پیش‌ تیمار اولتراسوند در فرآیند سرخ کردن صورت نگرفته است؛ ولی انتظار می‌رود با توجه به شباهت فرآیند سرخ کردن با خشک کردن از نظر دفع رطوبت [۱۲]، استفاده از امواج اولتراسوند در فرآیند سرخ کردن نتایج مشابهی در پی داشته باشد. علاوه بر این، اخیراً فرآیندهای سستی نظیر آبیگری اسمزی نیز مورد توجه روز افزون قرار گرفته است که عمدتاً به عنوان پیش‌ تیمار در تکنیک‌های ترکیبی به کار برده می‌شود. استفاده از این پیش‌ تیمار قبل از فرآیند سرخ کردن نیز برای تولید محصولات سرخ شده با کیفیت نهایی مطلوب مورد توجه می‌باشد. پیش‌ تیمار اسمزی، محتوای رطوبت اولیه ماده غذایی را کاهش داده و باعث افزایش چگالی ظاهری اولیه می‌گردد [۱۳-۱۶].

کروکیدا و همکاران [۱۴] استفاده از آبیگری اسمزی را به عنوان پیش‌ تیمار قبل از سرخ کردن مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که آبیگری اسمزی تأثیر چشمگیری روی دفع رطوبت و ویژگی‌های ساختاری و رنگ سیب‌زمینی سرخ شده داشت. در این مطالعه، از یک مدل نمایی نیز برای مدل‌سازی انتقال رطوبت استفاده گردید. پدرسچی و همکاران [۱۷] برخی ویژگی‌های فیزیکی مثل محتوای رطوبت را حین سرخ کردن برش‌های سیب‌زمینی پیش‌ تیمار شده با محلول اسمزی و آنزیم‌بری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصله از نقطه نظر دفع رطوبت نشان داد که رفتار نمونه شاهد و نمونه غوطه‌ور شده در محلول نمک کاملاً مشابه بود. ضریب انتشار مؤثر رطوبت گزارش شده در این پژوهش برای نمونه‌های غوطه‌ور شده در محلول نمک بین $3/1 \times 10^{-9}$ و $1/69 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه بود. ترونکوسو و پدرسچی [۱۶] طی مطالعه‌ای سینتیک دفع رطوبت را حین سرخ کردن سیب‌زمینی در فشار اتمسفر و تحت خلأ مورد بررسی قرار دادند. برش‌های سیب‌زمینی در فشار اتمسفر در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و تحت خلأ (۵/۳۷ کیلوپاسکال فشار مطلق) در دماهای ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد سرخ شدند. مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت **Error! Reference source not found.** در حین سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی شاهد، آنزیم-

1. *Solanum tuberosum*
2. Ultrasound

یک کاتر دستی به قطعاتی به شکل مکعب مستطیل به ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 4$ (ارتفاع \times عرض \times طول) برش داده شدند.

۲-۲- پیش تیمارها

قطعات برش داده شده قبل از سرخ کردن به منظور حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند و آب سطحی نیز توسط یک کاغذ خشک‌کن گرفته شد. نمونه‌ها بر حسب نوع پیش تیمار انجام شده، به گروه‌های مختلف زیر تقسیم شدند (جدول ۱) [۲۳،۲۲]:

۱: نمونه‌های شاهد

۲ و ۳: نمونه‌های قرار گرفته در معرض اولتراسونیکاسیون با استفاده از دستگاه حمام اولتراسوند (مدل USD-4R، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس در دو سطح ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و همچنین، تنظیم دما و زمان اولتراسونیکاسیون) در فرکانسهای ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و به مدت زمان ۱۵ دقیقه.

۴ و ۵: نمونه‌های آبگیری شده اسمزی با استفاده از محلول نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت ۱:۱۰ نمونه به محلول اسمزی به مدت ۳ ساعت.

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه‌های حاصل از تلفیق پیش تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی، که ابتدا در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانسهای ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار گرفته و سپس با استفاده از محلول‌های نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۳ ساعت تحت آبگیری اسمزی قرار گرفتند.

بری شده و آنزیم‌بری-خشک شده به ترتیب، $10^{-8} \times 1/73$ ، $10^{-8} \times 2/95$ مترمربعرئانیه‌گزارش شد.

علاوه بر پژوهش‌های مذکور، مطالعات متعدد دیگری در ارتباط با تأثیر پیش تیمارهای مختلف از جمله خشک کردن [۱۸]، آنزیم‌بری [۲۰، ۱۹]، پوشش دهی [۲۱] و آبگیری اسمزی [۲۳، ۲۲] 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 امواج اولتراسوند و آبگیری اسمزی به صورت همزمان بر میزان ضریب انتشار مؤثر و سینتیک دفع رطوبت طی فرآیند سرخ‌کردن محصول بررسی نشده است. بنابراین، با توجه به اهمیت این موارد، هدف از این پژوهش، بررسی سینتیک و مدل‌سازی انتقال جرم (دفع رطوبت) طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند و آبگیری اسمزی و همچنین، ارزیابی تأثیر متقابل این پیش تیمارها روی میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

مواد خام مورد استفاده در این پژوهش سیب‌زمینی و روغن سرخ‌کردنی بود. سیب‌زمینی‌های خریداری شده از بازار محلی (رقم آگریا) در سردخانه تاریک بالای صفر درجه نگهداری شدند. روغن سرخ‌کردنی مورد استفاده مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه دانه بود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا سیب‌زمینی‌ها شسته شده و پس از پوست‌گیری، با استفاده از

Table 1 Different treatments and their abbreviations

| Number | Pretreatment | Symbol |
|--------|--|----------|
| 1 | Control | Control |
| 2 | Ultrasoundwith frequencyof 28kHz | U28 |
| 3 | Ultrasoundwith frequencyof 40kHz | U40 |
| 4 | Osmotic dehydration with 2% NaCl solution | O2 |
| 5 | Osmotic dehydration with 4% NaCl solution | O4 |
| 6 | Ultrasoundwith frequencyof 28kHz–Osmotic dehydration with 2% NaCl solution | U28 – O2 |
| 7 | Ultrasoundwith frequencyof 40kHz–Osmotic dehydration with 2% NaCl solution | U40 – O2 |
| 8 | Ultrasoundwith frequencyof 28kHz–Osmotic dehydration with 4% NaCl solution | U28 – O4 |
| 9 | Ultrasoundwith frequencyof 40kHz–Osmotic dehydration with 4% NaCl solution | U40 – O4 |

در این پژوهش، یک سرخ‌کن خانگی (مولینکس، مدل F430.R، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°C) مورد استفاده قرار گرفت. سرخ‌کردن

۲-۳- شرایط سرخ کردن

۷-۲- اندازه‌گیری چگالی ظاهری

چگالی ظاهری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده از طریق رابطه زیر محاسبه گردید [۲۶]:

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (3)$$

ρ_{ap} : چگالی ظاهری محصول (g/cm^3)

M: جرم محصول (g)

V: حجم ظاهری محصول (cm^3)

۸-۲- مدل‌سازی ریاضی

در این مطالعه، دفع رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق برحسب چهار پارامتر زمان، محتوای روغن، میزان چروکیدگی و چگالی ظاهری مدل‌سازی شد. همچنین، از قانون انتشار فیک برای مدل‌سازی دفع‌رطوبت با گذشت زمان استفاده شد [۲۷]:

$$M_t = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e}$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (4)$$

M_t : مقدار رطوبت بدون بعد

m_t : مقدار رطوبت در لحظه t (g water/g dry basis)

m_0 : رطوبت اولیه سیب زمینی (g water/g dry basis)

m_e : رطوبت تعادلی (g water/g dry basis)

t : زمان (s)

D_{eff} : ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s)

L : نصف ضخامت صفحه (m)

برای به دست آوردن ضریب انتشار مؤثر رطوبت، نمودار لگاریتم محتوای رطوبت بدون بعد در برابر زمان رسم گردیده و ضریب انتشار مؤثر رطوبت از طریق شیب این نمودار محاسبه شد. مدل‌های پیشنهادی این تحقیق نیز از طریق برآزش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست آمد. این مدل‌سازی برای بررسی دفع رطوبت قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان و همچنین، برای بررسی میزان دفع رطوبت نمونه‌ها بر حسب محتوای روغن، میزان چروکیدگی و چگالی ظاهری انجام شد. ارزیابی مدل‌ها با استفاده از دو معیار ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

در ۳ دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان های ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه انجام گردید. سرخ‌کن با ۲ لیتر روغن سرخ‌کردنی پر شده و بعد از رسیدن روغن به دمای مورد نظر ۷ قطعه سیب‌زمینی داخل سبد مشبک قرار گرفته و به شکل اتوماتیک تا زمان مورد نظر سرخ شدند. روغن سطحی نمونه‌های سرخ‌شده بلافاصله پس از خروج از سرخ‌کن با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. پس از هر ۲ ساعت سرخ‌کردن، روغن داخل دستگاه تعویض می‌گردید. تمام آزمایشات حداقل ۲ بار تکرار شدند و مقادیر گزارش شده میانگین داده‌های حاصل از آزمایش می‌باشند.

۹-۲- اندازه‌گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت متوسط سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده با خشک کردن در یک آون همرفتی (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری گردیده و بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک گزارش شد [۲۴].

۱۰-۲- اندازه‌گیری محتوای روغن

محتوای روغن نمونه‌ها با بکارگیری روش استخراج سوکسله [۲۴] با استفاده از حلال پترولیوم اتر اندازه‌گیری شده و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک گزارش گردید.

۱۱-۲- اندازه‌گیری میزان چروکیدگی

میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید [۲۵]:

$$S_{(t)} = \frac{V_0 - V_{(t)}}{V_0} \quad (1)$$

$S_{(t)}$: درصد چروکیدگی

V_0 : حجم ظاهری نمونه قبل از سرخ‌شدن (cm^3)

$V_{(t)}$: حجم ظاهری نمونه پس از سرخ‌شدن (cm^3)

حجم ظاهری نمونه‌ها با به کارگیری تکنیک جابجایی‌حلال با استفاده از حلال تولوئن به کمک یک پیکنومتر شیشه‌ای، اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید [۲۵]:

$$V = \frac{(M + M_1 - M_2)}{\rho} \quad (2)$$

V : حجم ظاهری نمونه (cm^3)

M : وزن نمونه (g)

M_1 : وزن پیکنومتر خالی و حلال (g)

M_2 : وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (g)

ρ : چگالی تولوئن (g/cm^3)

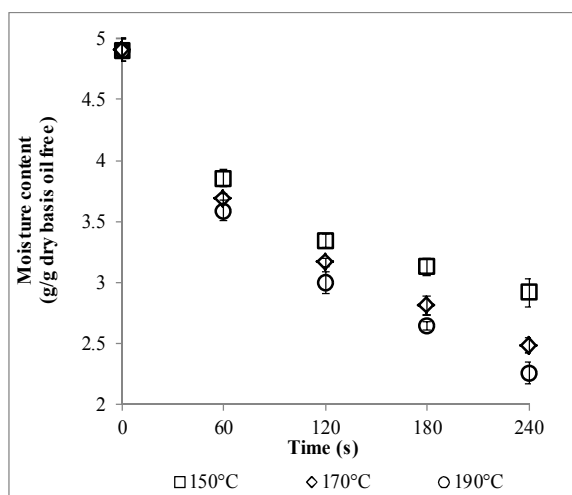


Fig 1 Moisture content of potato slices (Control) as a function of frying time at 150, 170 and 190°C

شکل ۲ (A)، تغییرات محتوای رطوبت را با گذشت زمان در نمونه‌های شاهد، پیش‌تیمارشده با اولتراسوند (فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ kHz) و آبگیری اسمزی (با محلول‌های ۲ و ۴٪ نمک) که در دمای ۱۵۰°C سرخ شده‌اند، نشان می‌دهد. محتوای رطوبت در تمامی نمونه‌های فوق با گذشت زمان کاهش یافت و روند دفع رطوبت در تمامی نمونه‌ها مشابه بود. بررسی تأثیر پیش‌تیمارها روی میزان محتوای رطوبت نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌های پیش‌تیمارشده با آبگیری اسمزی در محلول ۴/۴ نمک کمترین میزان محتوای رطوبت را در بین ۵ نمونه فوق داشت. در زمان‌های ابتدایی فرآیند سرخ‌کردن، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج اولتراسوند محتوای رطوبت بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند که دلیل این امر به جذب رطوبت طی فرآیند اولتراسونیکاسیون و بالابودن محتوای رطوبت اولیه این نمونه‌ها برمی‌گردد ولی در زمان‌های انتهایی سرخ‌کردن به دلیل تأثیر این فرآیند روی تسریع خروج رطوبت از ماده غذایی از طریق ایجاد کانال‌های موئین، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج اولتراسوند دارای محتوای رطوبت کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد بودند. نتایج حاصل از آنالیز آماری نشان داد که محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج اولتراسوند در فرکانس ۴۰kHz تفاوت معنی‌داری با نمونه‌های شاهد داشتند؛ در صورتیکه محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج اولتراسوند در فرکانس ۲۸kHz در مقایسه با نمونه‌های شاهد تفاوت آماری معنی‌داری نداشتند. بین محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند در دو فرکانس مختلف تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نگردید. محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده با آبگیری اسمزی تفاوت معنی‌داری با نمونه‌های شاهد از خود نشان دادند و همچنین، اختلاف بین

انجام شد. مدل‌هایی که دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تری بودند به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

۹-۲- محاسبه انرژی فعال‌سازی

با استفاده از رابطه آرنیوس، تأثیر دما روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت بررسی شد:

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

D_0 : پیش‌فاکتور نمایی

E_a : انرژی فعال‌سازی (J/mol)

R : ثابت جهانی گازها (۸/۳۰۹ J/mol K)

T : دما (K)

با رسم نمودار لگاریتم ضریب انتشار در برابر عکس دمای مطلق و به دست آوردن شیب آن، انرژی فعال‌سازی محاسبه گردید.

۱۰-۲- آنالیز آماری

در این مطالعه برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون بونفرونی^۱ در سطح احتمال ۵٪ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- دفع رطوبت

شکل ۱، تغییرات محتوای رطوبت نمونه‌های سرخ‌شده شاهد در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C را طی زمان سرخ‌کردن نشان می‌دهد. با گذشت زمان از محتوای رطوبت نمونه‌ها کاسته شده و آهنگ دفع رطوبت به دلیل نزدیک شدن به محتوای رطوبت تعادلی کاهش یافت و رفتار نمایی محتوای رطوبت براساس تابعی از زمان دیده شد. همچنین، از نقطه نظر تأثیر دما بر میزان محتوای رطوبت، ملاحظه شد که در زمان‌های یکسان با افزایش دما، نمونه‌ها دارای میزان محتوای رطوبت کمتری بودند. دلیل این امر، تسریع تبخیر رطوبت در اثر افزایش دما می‌باشد که نهایتاً باعث می‌شود نمونه‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده در زمان کمتری به محتوای رطوبت تعادلی برسند. با این وجود تأثیر دما روی میزان دفع رطوبت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

1. Bonferroni

دمای ۱۵۰، ۱۷۰، و ۱۹۰°C نشان می‌دهد. مقادیر بالای ضریب همبستگی نشان داد که قانون فیک به خوبی داده‌های آزمایشی مربوط به دفع رطوبت طی فرآیند سرخ کردن را برازش نمود. بررسی جدول ۲ نشان می‌دهد که افزایش دما در تمامی نمونه‌ها منجر به افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شد. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش‌های پدرسچی و مویانو [۱۷] و ترونکوسو و پدرسچی [۱۶] مطابقت داشت. افزایش دما از طریق بالا بردن سرعت تبخیر و کاهش بیشتر محتوای رطوبت در بازه زمانی یکسان باعث افزایش D_{eff} گردید.

همچنین، با توجه به جدول ۲، در بررسی تأثیر پیش‌تیمارها بر میزان D_{eff} مشاهده گردید که بیشترین میزان D_{eff} مربوط به نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آبگیری اسمزی در محلول ۴٪ نمک در هر سه دما بود. با مقایسه میزان D_{eff} نمونه‌های شاهد با نمونه‌های پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند نیز دیده شد که فرآیند اولتراسونیکاسیون در هر دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz باعث افزایش میزان D_{eff} گردید. افزایش میزان D_{eff} در استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند را می‌توان به شکل‌گیری کانال‌های میکروسکوپی در بافت بین سلولی سیب‌زمینی نسبت داد که به خروج سریع‌تر رطوبت از ماده غذایی کمک می‌نماید [۲۸، ۱۰]. مقایسه نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آبگیری اسمزی با نمونه‌های شاهد نشان داد که تیمار آبگیری اسمزی تأثیر معنی‌داری روی افزایش میزان D_{eff} این نمونه‌ها داشت. اختلاف بین D_{eff} نمونه‌های پیش‌تیمار شده با دو محلول مختلف نیز از لحاظ آماری معنی‌دار بود. در مواد غذایی با محتوای رطوبت بالا و با تخلخل پایین، انتشار مایع سازوکار اصلی انتقال رطوبت بوده و ضریب انتشار مؤثر رطوبت پایین است ولی در مواد غذایی با محتوای رطوبت متوسط مثل مواد غذایی آبگیری شده اسمزی، رطوبت از طریق انتشار بخار انتقال می‌یابد که در این حالت به دلیل اینکه منافذ و کانال‌ها اجازه انتقال راحت‌تر رطوبت را می‌دهند، میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد [۲۹]. با توجه به اینکه طی پیش‌تیمار آبگیری اسمزی محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. در بررسی تأثیر تلفیقی پیش‌تیمارها نیز مشاهده شد که به دلیل کاهش محتوای رطوبت بیشتر این نمونه‌ها طفرابند سرخ کردن (شکل ۲)، میزان D_{eff} کاهش پیدا کرد؛ چون در مواد با محتوای رطوبت پایین، دفع آب پیوسته به کندي صورت گرفته و D_{eff} کاهش می‌یابد.

نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آبگیری اسمزی در دو محلول ۲ و ۴٪ نیز از لحاظ آماری معنی‌دار بود. علاوه بر این، شکل ۲ (B)، تغییرات محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند (۲۸ و ۴۰ kHz) و آبگیری اسمزی (محلول‌های ۲ و ۴٪ نمک) را به صورت تلفیقی طی سرخ کردن نشان می‌دهد. محتوای رطوبت تمامی نمونه‌های پیش‌تیمار شده تلفیقی در مقایسه با نمونه شاهد، کاهش معنی‌داری از خود نشان دادند. بررسی نتایج حاصل از آنالیز آماری نیز نشان داد که در زمان‌های ابتدایی فرآیند اختلاف معنی‌داری بین محتوای رطوبت در نمونه‌های فوق وجود داشت ولی با گذشت زمان و نزدیک شدن به محتوای رطوبت تعادلی میزان اختلاف بین محتوای رطوبت نمونه‌ها کاهش یافته، بطوریکه این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

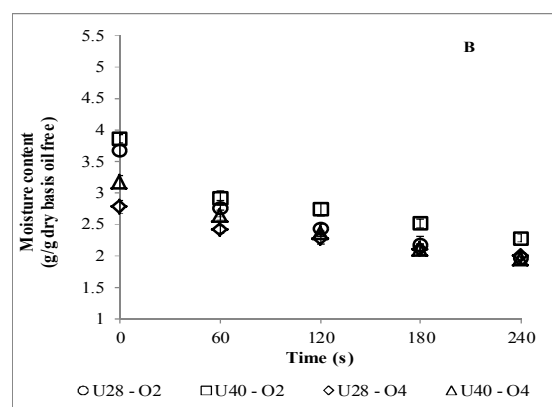
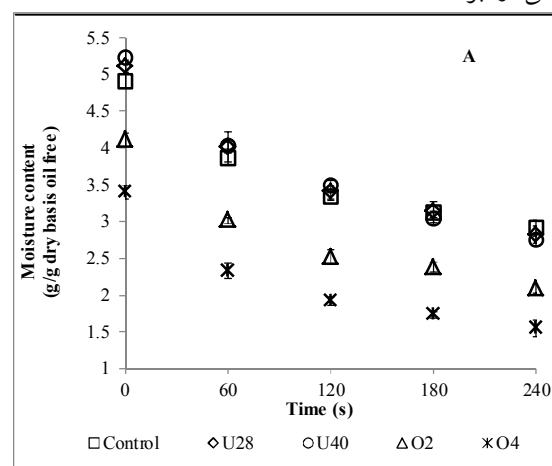


Fig 2 Moisture content variations of potato strips during frying at 150°C for various treatments based on Table 1 (A, B)

۲-۳- مدل‌سازی دفع رطوبت

جدول ۲، مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل از قانون فیک را برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های پیش‌تیمار شده در سه

Table 2 Magnitudes of effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) for various treatments based on Table 1

| Treatment | Temperature (°C) | | | | | |
|-----------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| | 150 | | 170 | | 190 | |
| | $D_{eff}(m^2/s) \times 10^{-8}$ | R^2 | $D_{eff}(m^2/s) \times 10^{-8}$ | R^2 | $D_{eff}(m^2/s) \times 10^{-8}$ | R^2 |
| Control | 3.043 ^{jl} ± 0.110 | 0.92 | 3.977 ^{kl} ± 0.058 | 0.96 | 4.523 ^{cl} ± 0.066 | 0.96 |
| U28 | 3.480 ^{hl} ± 0.110 | 0.95 | 4.091 ^{lg} ± 0.082 | 0.96 | 5.031 ^{cd} ± 0.250 | 0.93 |
| U40 | 3.823 ^{gh} ± 0.120 | 0.97 | 5.111 ^c ± 0.250 | 0.97 | 5.885 ^b ± 0.160 | 0.97 |
| O2 | 3.849 ^{gh} ± 0.057 | 0.92 | 4.696 ^{cde} ± 0.150 | 0.94 | 5.095 ^c ± 0.200 | 0.94 |
| O4 | 4.557 ^{dcl} ± 0.180 | 0.92 | 6.019 ^b ± 0.330 | 0.95 | 7.178 ^a ± 0.350 | 0.96 |
| U28 – O2 | 3.628 ^{gh} ± 0.038 | 0.94 | 4.777 ^{cde} ± 0.150 | 0.94 | 5.919 ^b ± 0.400 | 0.95 |
| U40 – O2 | 2.927 [±] 0.018 | 0.91 | 3.797 ^{gh} ± 0.130 | 0.95 | 3.880 ^{gh} ± 0.140 | 0.93 |
| U28 – O4 | 1.944 ^k ± 0.052 | 0.97 | 2.581 [±] 0.020 | 0.95 | 2.624 [±] 0.079 | 0.92 |
| U40 – O4 | 2.921 [±] 0.050 | 0.97 | 3.965 [±] 0.038 | 0.98 | 4.794 ^{cde} ± 0.100 | 0.97 |

Table 3 Kinetics modeling of potato dimensionless moisture content (M_t) as a function of time (t)*

| Reference | Models | No. |
|---------------|---------------------------|-----|
| Current study | $M_t = (1 - at)/(1 + bt)$ | 1 |
| ≠ | $M_t = \exp(-at^b)$ | 2 |
| ≠ | $M_t = \exp(-at/t + b)$ | 3 |
| ≠ | $M_t = at^2 + bt + 1$ | 4 |
| ≠ | $M_t = a/t + b$ | 5 |
| ≠ | $M_t = a \exp(-bt)$ | 6 |

*a, b: Model constants

علاوه بر مدل استفاده شده بر پایه قانون فیک، میزان دفع رطوبت در نمونه‌های مختلف طی فرآیند سرخ‌کردن با گذشت زمان با استفاده از مدل‌های ۱ تا ۶ جدول ۳ مدل‌سازی گردید. ضرایب و مقادیر R^2 و RMSE مدل‌های پیشنهادی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تمامی مدل‌های پیشنهادی با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین به خوبی توانستند داده‌های آزمایشی را برازش نمایند.

Table 4 Statistical parameters of models 1-6 in Table 3 for different treatments and temperatures during frying

| Model 1 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|--------|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|------|--------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | |
| | Treatment | a | b | R^2 | RMSE | a | b | R^2 | RMSE | a | b | R^2 |
| Control | 0.0058 | 0.0103 | 0.99 | 0.0049 | 0.0059 | 0.0080 | 0.99 | 0.0100 | 0.0063 | 0.0079 | 0.99 | 0.0118 |
| U28 | 0.0052 | 0.0077 | 0.99 | 0.0075 | 0.0053 | 0.0066 | 0.99 | 0.0023 | 0.0095 | 0.0125 | 0.99 | 0.0036 |
| U40 | 0.0051 | 0.0068 | 0.99 | 0.0066 | 0.0057 | 0.0058 | 0.99 | 0.0167 | 0.0070 | 0.0070 | 0.99 | 0.0075 |
| O2 | 0.0074 | 0.0114 | 0.99 | 0.0147 | 0.0080 | 0.0106 | 0.99 | 0.0101 | 0.0089 | 0.0114 | 0.99 | 0.0097 |
| O4 | 0.0092 | 0.0130 | 0.99 | 0.0064 | 0.0098 | 0.0112 | 0.99 | 0.0077 | 0.0108 | 0.0113 | 0.99 | 0.0100 |
| U28 – O2 | 0.0063 | 0.0097 | 0.99 | 0.0119 | 0.0083 | 0.0108 | 0.99 | 0.0045 | 0.0089 | 0.0100 | 0.99 | 0.0034 |
| U40 – O2 | 0.0066 | 0.0129 | 0.98 | 0.0226 | 0.0062 | 0.0091 | 0.99 | 0.0158 | 0.0076 | 0.0117 | 0.99 | 0.0108 |
| U28 – O4 | 0.0025 | 0.0050 | 0.99 | 0.0094 | 0.0039 | 0.0070 | 0.99 | 0.0091 | 0.0053 | 0.0106 | 0.99 | 0.0119 |
| U40 – O4 | 0.0035 | 0.0049 | 0.99 | 0.0052 | 0.0047 | 0.0057 | 0.99 | 0.0045 | 0.0061 | 0.0069 | 0.99 | 0.0026 |

| Model 2 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|-------|------|--------|-------|-------|------|--------|-------|-------|------|--------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | |
| | Treatment | a | b | R^2 | RMSE | a | b | R^2 | RMSE | a | b | R^2 |
| Control | 0.028 | 0.534 | 0.99 | 0.0095 | 0.022 | 0.624 | 0.99 | 0.0034 | 0.021 | 0.648 | 0.99 | 0.0065 |
| U28 | 0.019 | 0.623 | 0.99 | 0.0094 | 0.016 | 0.687 | 0.99 | 0.0084 | 0.043 | 0.547 | 0.99 | 0.0069 |
| U40 | 0.016 | 0.664 | 0.99 | 0.0028 | 0.012 | 0.772 | 0.99 | 0.0212 | 0.017 | 0.743 | 0.99 | 0.0127 |
| O2 | 0.036 | 0.531 | 0.99 | 0.0151 | 0.034 | 0.576 | 0.99 | 0.0025 | 0.038 | 0.570 | 0.99 | 0.0044 |
| O4 | 0.045 | 0.520 | 0.99 | 0.0079 | 0.037 | 0.607 | 0.99 | 0.0081 | 0.036 | 0.641 | 0.99 | 0.0039 |
| U28 – O2 | 0.028 | 0.562 | 0.99 | 0.0043 | 0.034 | 0.578 | 0.99 | 0.0098 | 0.030 | 0.637 | 0.99 | 0.0080 |
| U40 – O2 | 0.038 | 0.470 | 0.99 | 0.0153 | 0.026 | 0.581 | 0.99 | 0.0085 | 0.037 | 0.524 | 0.99 | 0.0033 |
| U28 – O4 | 0.008 | 0.660 | 0.99 | 0.0062 | 0.015 | 0.611 | 0.99 | 0.0092 | 0.028 | 0.508 | 0.99 | 0.0077 |
| U40 – O4 | 0.009 | 0.713 | 0.99 | 0.0057 | 0.013 | 0.718 | 0.99 | 0.0039 | 0.017 | 0.699 | 0.99 | 0.0074 |

| Model 3 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|-----|------|----------------|-------|-----|------|----------------|-------|-----|------|----------------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | |
| | Treatment | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² |
| Control | 0.811 | 138 | 0.99 | 0.0049 | 1.220 | 204 | 0.99 | 0.0106 | 1.385 | 209 | 0.99 | 0.0133 |
| U28 | 1.06 | 199 | 0.99 | 0.0079 | 1.239 | 209 | 0.99 | 0.0103 | 1.363 | 145 | 0.99 | 0.0042 |
| U40 | 1.167 | 209 | 0.99 | 0.0099 | 1.486 | 209 | 0.99 | 0.0288 | 1.730 | 209 | 0.99 | 0.0218 |
| O2 | 1.017 | 136 | 0.99 | 0.0148 | 1.323 | 165 | 0.99 | 0.0108 | 1.423 | 161 | 0.99 | 0.0104 |
| O4 | 1.194 | 131 | 0.99 | 0.0067 | 1.780 | 186 | 0.99 | 0.0085 | 2.204 | 209 | 0.99 | 0.0121 |
| U28 – O2 | 1.003 | 157 | 0.99 | 0.0123 | 1.360 | 166 | 0.99 | 0.0047 | 1.842 | 209 | 0.99 | 0.0044 |
| U40 – O2 | 0.718 | 109 | 0.98 | 0.0228 | 1.081 | 171 | 0.99 | 0.0162 | 1.019 | 134 | 0.99 | 0.0112 |
| U28 – O4 | 0.594 | 209 | 0.99 | 0.0107 | 0.763 | 187 | 0.99 | 0.0095 | 0.671 | 124 | 0.99 | 0.0121 |
| U40 – O4 | 0.872 | 209 | 0.99 | 0.0131 | 1.176 | 209 | 0.99 | 0.0156 | 1.440 | 209 | 0.99 | 0.0130 |

| Model 4 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|--------------------|------|----------------|-------|--------------------|------|----------------|-------|--------------------|------|----------------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | |
| | Treatment | a×10 ⁻⁶ | b | R ² | RMSE | a×10 ⁻⁶ | b | R ² | RMSE | a×10 ⁻⁶ | b | R ² |
| Control | 8.494 | -0.0036 | 0.98 | 0.0209 | 8.527 | -0.0040 | 0.98 | 0.0275 | 9.171 | -0.0043 | 0.98 | 0.0303 |
| U28 | 7.839 | -0.0036 | 0.99 | 0.0203 | 8.237 | -0.0040 | 0.99 | 0.0130 | 0.132 | -0.0054 | 0.98 | 0.0351 |
| U40 | 7.687 | -0.0037 | 0.99 | 0.0198 | 9.092 | -0.0045 | 0.99 | 0.0145 | 0.109 | -0.0051 | 0.99 | 0.0138 |
| O2 | 0.103 | -0.0044 | 0.97 | 0.0355 | 0.112 | -0.0049 | 0.97 | 0.0366 | 0.123 | -0.0053 | 0.97 | 0.0397 |
| O4 | 0.124 | -0.0051 | 0.97 | 0.0374 | 0.137 | -0.0058 | 0.98 | 0.0397 | 0.149 | -0.0064 | 0.97 | 0.0465 |
| U28 – O2 | 8.800 | -0.0039 | 0.97 | 0.0317 | 0.119 | -0.0051 | 0.98 | 0.0300 | 0.130 | -0.0056 | 0.98 | 0.0320 |
| U40 – O2 | 8.016 | -0.0035 | 0.94 | 0.0427 | 8.604 | -0.0040 | 0.97 | 0.0347 | 0.103 | -0.0044 | 0.97 | 0.0352 |
| U28 – O4 | 3.626 | -0.0020 | 0.99 | 0.0137 | 5.825 | -0.0028 | 0.99 | 0.0181 | 7.169 | -0.0032 | 0.97 | 0.0286 |
| U40 – O4 | 5.225 | -0.0028 | 0.99 | 0.0099 | 7.077 | -0.0036 | 0.99 | 0.0162 | 9.397 | -0.0045 | 0.99 | 0.0168 |

| Model 5 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|-------|------|----------------|-------|-------|------|----------------|-------|-------|-------|----------------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | |
| | Treatment | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² |
| Control | 316.3 | 324.8 | 0.96 | 0.0373 | 233.4 | 237.3 | 0.98 | 0.0254 | 198.7 | 201.3 | 0.99 | 0.0221 |
| U28 | 277.7 | 282.5 | 0.98 | 0.0266 | 230.3 | 232.5 | 0.99 | 0.0166 | 154.4 | 157.2 | 0.98 | 0.0347 |
| U40 | 251.1 | 254.5 | 0.99 | 0.0198 | 176.8 | 176.4 | 0.99 | 0.0167 | 143 | 142.9 | 0.999 | 0.0075 |
| O2 | 228.2 | 234 | 0.96 | 0.0413 | 177.9 | 181.1 | 0.98 | 0.0314 | 156.7 | 159.3 | 0.98 | 0.0312 |
| O4 | 175.8 | 179.8 | 0.97 | 0.0404 | 125 | 126.1 | 0.99 | 0.0218 | 99.87 | 100.3 | 0.99 | 0.0129 |
| U28 – O2 | 256.2 | 262.5 | 0.97 | 0.0341 | 171 | 173.8 | 0.98 | 0.0308 | 131 | 131.9 | 0.99 | 0.0166 |
| U40 – O2 | 331.4 | 343.4 | 0.93 | 0.0463 | 244.7 | 250.2 | 0.98 | 0.0327 | 226.2 | 232.3 | 0.97 | 0.0397 |
| U28 – O4 | 599.7 | 609.2 | 0.98 | 0.0183 | 411.4 | 419.6 | 0.97 | 0.0266 | 387 | 399 | 0.95 | 0.0379 |
| U40 – O4 | 366.3 | 370.4 | 0.99 | 0.0153 | 246.5 | 248.5 | 0.99 | 0.0126 | 186.5 | 187.7 | 0.99 | 0.0123 |

| Model 6 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|----------|------|----------------|-------|---------|------|----------------|-------|----------|------|----------------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | |
| | Treatment | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² |
| Control | 0.953 | -0.0022 | 0.92 | 0.0518 | 0.959 | -0.0029 | 0.95 | 0.0460 | 0.96 | -0.0033 | 0.96 | 0.0466 |
| U28 | 0.962 | -0.0025 | 0.95 | 0.0439 | 0.967 | -0.0030 | 0.97 | 0.0397 | 0.944 | -0.0039 | 0.93 | 0.0686 |
| U40 | 0.964 | -0.0028 | 0.97 | 0.0394 | 0.976 | -0.0037 | 0.97 | 0.0386 | 0.971 | -0.0044 | 0.98 | 0.0409 |
| O2 | 0.947 | -0.0029 | 0.92 | 0.0620 | 0.949 | -0.0036 | 0.94 | 0.0596 | 0.947 | -0.00397 | 0.94 | 0.0638 |
| O4 | 0.942 | -0.0035 | 0.92 | 0.0695 | 0.952 | -0.0047 | 0.95 | 0.0633 | 0.956 | -0.0056 | 0.96 | 0.0607 |
| U28 – O2 | 0.952 | -0.0027 | 0.93 | 0.0520 | 0.950 | -0.0037 | 0.94 | 0.0617 | 0.956 | -0.00462 | 0.96 | 0.0577 |
| U40 – O2 | 0.946 | -0.00217 | 0.90 | 0.0571 | 0.953 | -0.0028 | 0.94 | 0.0508 | 0.945 | -0.0029 | 0.92 | 0.0607 |
| U28 – O4 | 0.976 | -0.0013 | 0.96 | 0.0235 | 0.967 | -0.0018 | 0.94 | 0.0364 | 0.954 | -0.0019 | 0.92 | 0.0479 |
| U40 – O4 | 0.975 | -0.0020 | 0.97 | 0.0276 | 0.971 | -0.0028 | 0.98 | 0.0333 | 0.966 | -0.0035 | 0.97 | 0.0416 |

به خوبی مشاهده می‌شود که با افزایش زمان سرخ کردن، میزان دفع رطوبت در فواصل زمانی یکسان کاهش یافته و به سمت محتوای رطوبت تعادلی میل می‌نماید. پیش تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی باعث کاهش محتوای رطوبت بدون بعد

شکل ۳، محتوای رطوبت بدون بعد حاصل از آزمایش و محاسبه شده با مدل پیشنهادی شماره ۲ را در شرایط مختلف دما و زمان و پیش تیمارهای مختلف بر حسب زمان فرآیند نشان می‌دهد. در این شکل رفتار نمایی دفع رطوبت با گذشت زمان

درجه سانتی‌گراد می‌باشد ولی با افزایش دما محتوای رطوبت بدون بعد در زمان‌های یکسان از میزان کمتری برخوردار می‌گردد.

نسبت به نمونه‌های شاهد در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های یکسان گردیدند و تأثیر آبیگری اسمزی به مراتب بیشتر از استفاده از امواج اولتراسوند بود. روند تغییرات در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نیز مشابه دمای ۱۵۰

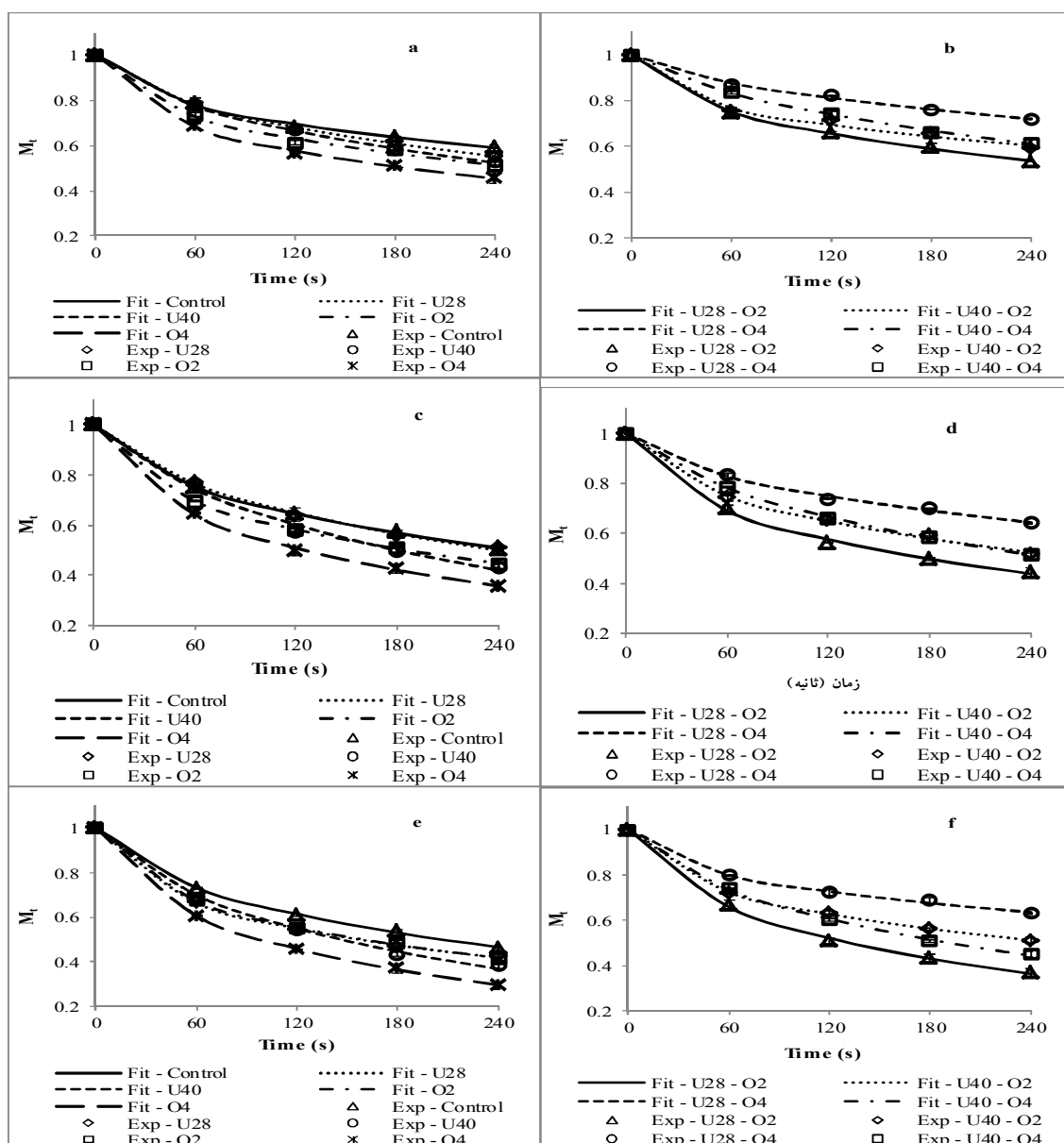


Fig 3 Moisture content variations of potato slices based on experimental (Exp) and predicted (Fit) data (model 2, Table 3) for various treatments based on Table 1 at 150°C (a,b), 170°C (c,d) and 190°C (e,f)

ضرایب و مقادیر R^2 و RMSE مربوط به این مدل‌ها نیز در جدول ۶ مشاهده می‌شود. این مدل‌ها با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش نمودند. شکل ۴ (a, b, c) برازش داده‌های آزمایشی محتوای رطوبت

همچنین، در این مطالعه، میزان دفع رطوبت در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده در شرایط مختلف دما، زمان و پیش‌تیمارهای مختلف بر حسب سه پارامتر محتوای روغن، میزان چروکیدگی و چگالی ظاهری نیز مدل‌سازی شد (جدول ۵).

Table 5 Dimensionless moisture content (M_t) modeling of potato slices during frying process as a function of oil content (O), shrinkage ($S_{(t)}$) and apparent density (ρ)

| Reference | Models | No. |
|---------------|-----------------------------------|-----|
| Current study | $M_t = 1 - aO$ | 1 |
| " | $M_t = 1 + aS_{(t)}^2 - bS_{(t)}$ | 2 |
| " | $M_t = a\rho^b + c$ | 3 |

بدون بعد را به ترتیب نسبت به محتوای روغن، میزان چروکیدگی و چگالی ظاهری با مقادیر محاسبه شده با استفاده از مدل‌های ۱، ۲ و ۳ جدول ۵ در نمونه‌های شاهد و دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C نشان می‌دهد.

Table 6 Statistical parameters of models 1-3 in Table 5 for different treatments and temperatures during frying

| Model 1 | Temperature (°C) | | | | | | | | |
|-----------|------------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|
| | 150 | | | 170 | | | 190 | | |
| Treatment | a | R ² | RMSE | a | R ² | RMSE | a | R ² | RMSE |
| Control | 1.987 | 0.99 | 0.0113 | 2.123 | 0.95 | 0.0424 | 2.21 | 0.93 | 0.0559 |
| U28 | 2.81 | 0.99 | 0.0099 | 2.406 | 0.99 | 0.0190 | 2.5 | 0.95 | 0.0508 |
| U40 | 2.155 | 0.99 | 0.0149 | 2.214 | 0.92 | 0.0626 | 2.134 | 0.87 | 0.0886 |
| O2 | 3.41 | 0.98 | 0.0249 | 0.0249 | 0.97 | 0.0359 | 3.453 | 0.95 | 0.0494 |
| O4 | 0.0494 | 0.99 | 0.0112 | 4.33 | 0.98 | 0.0336 | 4.31 | 0.94 | 0.0682 |
| U28 - O2 | 4.041 | 0.99 | 0.0175 | 4.457 | 0.99 | 0.0085 | 4.499 | 0.99 | 0.0264 |
| U40 - O2 | 3.241 | 0.98 | 0.0197 | 3.51 | 0.99 | 0.0170 | 3.404 | 0.99 | 0.0160 |
| U28 - O4 | 2.641 | 0.98 | 0.0160 | 3.001 | 0.99 | 0.0143 | 2.983 | 0.98 | 0.0167 |
| U40 - O4 | 3.563 | 0.99 | 0.0099 | 3.921 | 0.99 | 0.0188 | 0.0188 | 0.98 | 0.0246 |

| Model 2 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|--------|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | |
| Treatment | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² | RMSE | a | b | R ² | RMSE |
| Control | -2.362 | -0.460 | 0.99 | 0.0198 | -3.936 | -0.123 | 0.99 | 0.0246 | -5.801 | 0.378 | 0.99 | 0.0224 |
| U28 | -1.6 | -0.851 | 0.99 | 0.0126 | -2.129 | -0.471 | 0.99 | 0.0230 | -1.8 | -0.719 | 0.98 | 0.0393 |
| U40 | -3.669 | -0.290 | 0.99 | 0.0095 | -6.272 | 0.459 | 0.99 | 0.0180 | -9.233 | 0.995 | 0.99 | 0.0298 |
| O2 | -7.582 | 1.477 | 0.93 | 0.0576 | -4.9 | 0.464 | 0.84 | 0.1015 | 1.02 | -1.679 | 0.83 | 0.1091 |
| O4 | 1.11 | -1.47 | 0.84 | 0.0988 | 0.3418 | -1.326 | 0.84 | 0.1191 | 0.647 | -1.674 | 0.86 | 0.12 |
| U28 - O2 | 1.846 | -1.669 | 0.81 | 0.0912 | 1.463 | -1.739 | 0.82 | 0.108 | -4.618 | 0.32 | 0.90 | 0.0931 |
| U40 - O2 | -6.806 | 1.371 | 0.99 | 0.0204 | -14.67 | 3.675 | 0.96 | 0.0433 | 7.032 | -3.685 | 0.85 | 0.0847 |
| U28 - O4 | -10.12 | 3.139 | 0.99 | 0.0068 | 13.44 | -5.856 | 0.90 | 0.0515 | 8.486 | -4.095 | 0.86 | 0.0629 |
| U40 - O4 | -3.249 | 0.180 | 0.87 | 0.0628 | 2.63 | -1.962 | 0.72 | 0.1159 | 19.39 | -8.257 | 0.81 | 0.1102 |

| Model 3 | Temperature (°C) | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|--------|-------|----------------|--------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|-------|--------|----------------|--------|
| | 150 | | | | 170 | | | | 190 | | | | | | |
| Treatment | a | b | c | R ² | RMSE | a | b | c | R ² | RMSE | a | b | c | R ² | RMSE |
| Control | 0.030 | 35.27 | 0.479 | 0.99 | 0.0137 | 0.022 | 38.37 | 0.502 | 0.99 | 0.0145 | 0.090 | 21.48 | 0.437 | 0.99 | 0.0140 |
| U28 | 0.018 | 46.68 | 0.483 | 0.97 | 0.0272 | 0.058 | 28.72 | 0.493 | 0.99 | 0.0021 | 0.090 | 24.92 | 0.418 | 0.99 | 0.0126 |
| U40 | 0.001 | 72.76 | 0.524 | 0.98 | 0.0252 | 3E-06 | 159.6 | 0.459 | 0.97 | 0.0441 | 0.0002 | 115.5 | 0.407 | 0.98 | 0.0369 |
| O2 | 0.085 | 19.67 | 0.454 | 0.99 | 0.0104 | 0.204 | 7.834 | 0.368 | 0.99 | 0.0126 | 1.506 | 0.763 | -0.896 | 0.99 | 0.0132 |
| O4 | 0.165 | 12.6 | 0.363 | 0.99 | 0.0071 | 0.163 | 13.14 | 0.330 | 1 | 0.0014 | 0.218 | 10.25 | 0.269 | 0.99 | 0.0078 |
| U28 - O2 | -0.339 | -5.968 | 0.978 | 0.99 | 0.0156 | 0.664 | 3.089 | -0.104 | 0.99 | 0.0104 | 0.315 | 6.355 | 0.201 | 0.98 | 0.0308 |
| U40 - O2 | -0.119 | -14.02 | 0.793 | 0.96 | 0.0243 | -0.424 | -4.013 | 1.056 | 0.99 | 0.0107 | 0.670 | 2.01 | -0.047 | 0.98 | 0.0233 |
| U28 - O4 | -0.320 | -3.495 | 1.145 | 0.95 | 0.0250 | 2.101 | 0.517 | -1.331 | 0.99 | 0.0099 | 0.014 | 18.15 | 0.888 | 0.97 | 0.0230 |
| U40 - O4 | -1.149 | -1.418 | 1.879 | 0.95 | 0.0385 | 29.82 | 0.0557 | -29.13 | 0.99 | 0.0035 | 0.549 | 3.532 | 0.090 | 0.99 | 0.0213 |

محتوای رطوبت پایین مشاهده می‌شود که ناشی از برهم‌کنش‌های قوی بین آب و مواد دیگر می‌باشد. شکل ۵، تأثیر دما بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت را با استفاده از رابطه آرنیوس نشان می‌دهد. با افزایش دما (کاهش $1/T$) ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت. این نتیجه نیز با نتایج حاصل از پژوهش ترئونکوسو و پدرسچی [۱۶] شباهت دارد.

Table 7 Activation energy (E_a) and pre-exponential factor (D_0) of effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) during frying for different treatments based on Table 1

| R^2 | $D_{eff}(m^2/s)$ | | Treatment |
|-------|-------------------------------------|-------------------|-----------|
| | $D_0 \times 10^{-7}$ (m^2/s) | E_a (kJ/mol) | |
| 0.97 | 0.316 | -16.21 | Control |
| 0.99 | 0.244 | -14.93 | U28 |
| 0.97 | 0.587 | -17.63 | U40 |
| 0.96 | 0.104 | -11.45 | O2 |
| 0.99 | 0.900 | -18.52 | O4 |
| 1 | 0.984 | -19.92 | U28 – O2 |
| 0.83 | 8.460 | -11.59 | U40 – O2 |
| 0.81 | 6.780 | -12.35 | U28 – O4 |
| 0.99 | 0.978 | -20.21 | U40 – O4 |

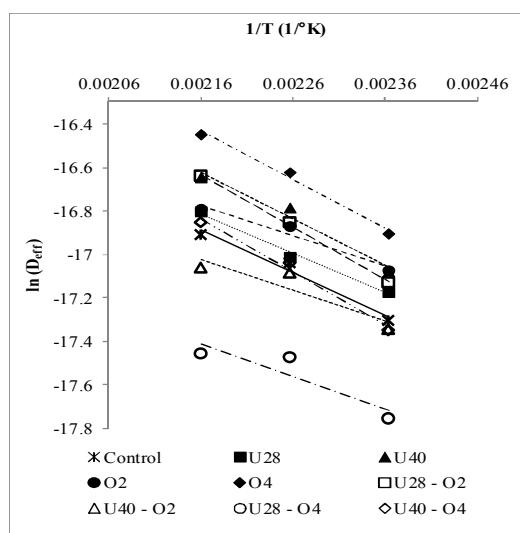


Fig 5 Variations of $\ln(D_{eff})$ versus the reciprocal of absolute temperature for various treatments based on Table 1

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی در فرآیند سرخ‌کردن می‌تواند

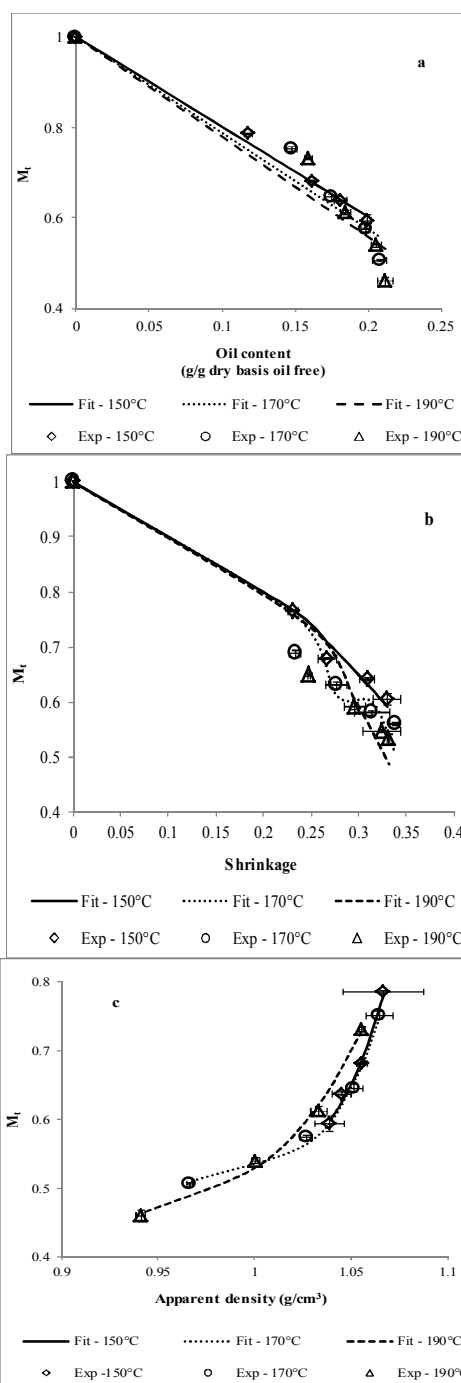


Fig 4 Moisture content variations of control potato slices based on experimental (Exp) and predicted (Fit) data (models 1, 2 and 3 in Table 5) as a function of oil content (a), shrinkage (b) and apparent density (c) at various temperatures

مقادیر انرژی فعال‌سازی در نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده نیز در جدول ۷ آمده است. مقادیر به دست آمده برای انرژی فعال‌سازی در این تحقیق تقریباً با مقادیری که توسط ساراواکوس و مارولیس [۲۹] طی انجام مطالعه‌ای برای انتشار رطوبت در مواد نشاسته‌ای به دست آمده است، مطابقت دارد. مقادیر بالای انرژی فعال‌سازی معمولاً در مواد غذایی با

- Journal of Food Science and Technology*, 22(3), 233–241.
- [7] Kozempel, M. F., Tomasula, P. M., & Craig, J. C. (1991). Correlation of moisture and oil concentration in French fries *LWT-Food Science and Technology*, 24(5), 445–448.
- [8] Moreira, R. G., Palau, J., Castelle-Perez, M. E., Sweat, V. E., & Gomez, M. H. (1991). Moisture loss and oil absorption during deep-fat frying of tortilla chips. *American Society of Agricultural Engineers (ASAE)* (pp. Paper No. 91-6501). St. Joseph, MI, USA.
- [9] Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2007). Use of ultrasound as pretreatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82(2), 261–267.
- [10] Fernandes, F. A. N., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 186-190.
- [11] Garcia-Noguera, J., Oliveiray, F. I. P., Gallao, M. I., Weller, C. L., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2010). Ultrasound assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), 294–303.
- [12] Farid, M., & 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(1), 217–223.
- [13] Ikoko, J., & Kuri, V. (2007). Osmotic pretreatment effect on fat intake reduction and eating quality of deep-fried plantain. *Food Chemistry*, 102(2), 523–531.
- [14] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (2001). Effect of osmotic dehydration pretreatment on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 339–345.
- [15] Mai Tran, T. T., Dong Chen, X., & Southern, C. (2007). Reducing oil content of fried potato crisps considerably using a 'sweet' pre-treatment technique. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 719–726.
- [16] 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.
- محتوای رطوبت را نسبت به نمونه شاهد کاهش دهد. استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند در هر دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz باعث افزایش D_{eff} در تمامی دماها شد. علاوه بر این، استفاده از پیش‌تیمار آبیگری اسمزی نیز در هر دو غلظت ۲ و ۴٪ محلول اسمزی نمک، منجر به افزایش معنی‌دار D_{eff} گردید. همچنین، مدل‌های تجربی پیشنهاد شده به خوبی توانستند داده‌های محتوای رطوبت بدون بعد را بر حسب زمان، محتوای روغن، میزان چروکیدگی و چگالی ظاهری با ضریب همبستگی بالا برازش نمایند. این مدل‌ها می‌توانند مدل‌های مفید و کاربردی جهت استفاده در فرآیند سرخ‌کردن عمیق، در شرایط دما و زمانی مختلف بوده و به کنترل کیفیت محصول نهایی سرخ‌شده از لحاظ داشتن یک محتوای رطوبت معین کمک کنند. بنابراین، استفاده از اولتراسوند بصورت تنها یا ترکیبی با روش‌های دیگر به عنوان یک روش امید بخش در بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات سرخ‌شده، از جمله کاهش سریع‌تر محتوای رطوبت و در نتیجه کاهش زمان فرآیند سرخ‌کردن می‌تواند در پژوهش‌های آتی مد نظر قرار گیرد.

۵- منابع

- [1] <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- [2] Mir-Bel, J., Oria, R., & Salvador, M. L. (2009). Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering*, 95(3), 416-422.
- [3] 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.
- [4] Banga, J. R., Alonso, A. A., Gallardo, J. M., & Perez-Martin, R. I. (1993). Mathematical modelling and simulation of the thermal processing of anisotropic and non-homogeneous conduction-heated canned foods: Application to canned tuna. *Journal of Food Engineering*, 18(4), 369–387.
- [5] Ashkenazi, N., Mizrahi, S., & Berk, Z. (1984). *Heat and mass transfer in frying*. London, UK: Elsevier Applied Science Publishers.
- [6] Gamble, M. H., Rice, P., & Selman, J. D. (1987). Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record UK Tubers. *International*

- Journal of Food Science and Technology*, 13(50), 79-94 [In Persian].
- [23] Barmour, M., Dehghannya, J., & Ghanbarzadeh, B. (2017). Coupled effect of ultrasound, microwave and osmotic dehydration pretreatments on water loss kinetics during deep-fat frying of potatoes. *Journal of Food Research*, 26(3), 543-561 [In Persian].
- [24] AOAC (1994). Official methods of Analysis Association of Official Analytical Chemists. Arlington, VA.
- [25] 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.
- [26] Ziaiiifar, A. M., Achir, N., F., C., Trezzani, I., & Trystram, G. (2008). Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science and Technology*, 43(8), 1410-1423.
- [27] Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford: Clarendon Press.
- [28] Fernandes, F. A. N., Linhares Jr., F. E., & Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapples. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(6), 1049-1054.
- [29] Saravacos, G. D., & Maroulis, Z. B. (2001). *Transport Properties of Foods*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [17] Pedreschi, F., Moyano, P., Santis, N., & Pedreschi, R. (2007). Physical properties of pre-treated potato chips. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1474-1482.
- [18] Naghavi, E.-A., Dehghannya, J., Ghanbarzadeh, B., & Rezaei-Mokarram, R. (2013). Empirical shrinkage modeling of potato strips pretreated with ultrasound and drying during deep-fat frying. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 8(3), 90-111 [In Persian].
- [19] Razzagh-Pour, E., Dehghannya, J., & Ghanbarzadeh, B. (2014). The effect of ultrasound and blanching on oil uptake during deep-fat frying of potato. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 2(4), 323-338 [In Persian].
- [20] Alizadeh-Zeinab, S., Dehghannya, J., & Sowti-Khiyabani, M. (2013). Effect of blanching and edible hydrocolloids on reduction of oil uptake during frying of potato sticks. *Journal of Innovative Food Technologies*, 1(1), 21-36 [In Persian].
- [21] Ronaghi, T., Dehghannya, J., & Ghanbarzadeh, B. (2016). Empirical modeling of oil uptake and investigating the influence of ultrasound and edible coating during frying of potato strips. *Journal of Food Research*, 26(2), 221-245 [In Persian].
- [22] Abedpour, L., & Dehghannya, J. (2016). Investigation of oil uptake during potato strips deep-fat frying pretreated with ultrasound and osmotic dehydration. *Iranian*

Moisture loss kinetics modeling during deep-fat frying of potato strips pretreated with ultrasound and osmotic dehydration

Dehghannya, J.^{1*}, Abedpour, L.²

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

(Received: 2017/03/12 Accepted: 2018/09/04)

Deep-fat frying is one of the processing methods of potato which is chosen to produce a favorable flavor, taste, color and texture in processed foodstuffs. The aim of this study was to investigate moisture loss kinetics in fried potato strips and modeling moisture transfer in the samples by applying ultrasound pretreatment at two frequencies of 20 and 40 kHz as well as osmotic dehydration pretreatment using 2 and 4% salt solution concentration. In this study, the Fick's law was used as one of the moisture transfer models and the obtained effective moisture diffusion coefficient values were between 1.945×10^{-8} and 7.178×10^{-8} m²/s, with an average correlation coefficient of 0.948. Both the pretreatments used effectively increased the effective moisture diffusion coefficient during frying of potato strips. In addition to the Fick's model, 6 empirical models were also used to model moisture transfer. Also, use of the Arrhenius equation to determine the influence of temperature on the effective moisture diffusion coefficient showed that rising temperature leads to an increase in the coefficient during the frying process.

Keywords: Frying, Mass Transfer, Moisture loss, Process time, Effective moisture diffusion coefficient

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