

مدل‌سازی سینتیک از دست‌دادن رطوبت طی فرایند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با مافوق‌صوت و خشک‌کردن

عنایت‌الله نقوی^۱، جلال دهقان‌نیا^{۲*}، بابک قنبرزاده^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۲. استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۳. دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: 92/8/18، تاریخ پذیرش: 92/9/8)

چکیده

این تحقیق، با هدف بررسی تاثیر پیش‌تیمارهای مافوق‌صوت و خشک‌کردن بر محتوی رطوبتی، ضریب انتشار موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی قطعه‌های سیب‌زمینی و هم‌چنین، مدل‌سازی محتوی رطوبتی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق انجام شد. به این منظور، پیش‌تیمار مافوق‌صوت در دو سطح بسامد 28 و 40 کیلوهرتز و زمان 15 دقیقه و هم‌چنین، پیش‌تیمار خشک‌کردن در دو زمان 8 و 15 دقیقه و دمای 80 درجه سانتی‌گراد صورت‌گرفته و سپس سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی در دماهای 150، 170 و 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 60، 120، 180 و 240 ثانیه انجام شد. از طرف دیگر، به منظور مدل‌سازی محتوی رطوبتی، داده‌های آزمایشی با شش مدل تجربی (1 مدل از کارهای تحقیقاتی قبلی و 5 مدل پیشنهادی در این تحقیق) و قانون دوم فیک برازش شد. نتایج نشان داد که پیش‌تیمارهای مافوق‌صوت و خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه به صورت مجزا، محتوی رطوبتی را به طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهند. هم‌چنین، در نمونه‌های پیش‌تیمارشده به صورت تلفیقی، کاهش در محتوی رطوبتی نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. علاوه‌براین، با افزایش دما، میزان ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش یافت و محدوده به دست آمده برای آن، $6/20 \times 10^{-8} - 3/57 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ بود. از طرف دیگر، مدل‌های به کاررفته با $R^2 = 0/9455 - 1$ و $RMSE = 0/001 - 0/048$ ، به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش کردند. هم‌چنین، از طریق انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، مدل‌هایی با R^2 بالا نیز، به جهت قابلیت کاربرد در شرایط مختلف زمان و دمایی فرایند سرخ‌کردن عمیق نمونه‌های مختلف، پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، سرخ‌کردن عمیق، محتوی رطوبتی، مافوق‌صوت، سیب‌زمینی، خشک‌کردن.

* مسئول مکاتبات: dehghannya@tabrizu.ac.ir

1- مقدمه

از طرف دیگر، برای پیش‌بینی صحیح روند سرخ‌شدن مواد غذایی با هدف افزایش کیفیت محصول سرخ‌شده، می‌توان تغییرات محتوی رطوبتی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق را مدل‌سازی نمود. مدل‌سازی محتوی رطوبتی، روابط بین متغیرهای گوناگون، از جمله محتوی رطوبتی و زمان را ارائه می‌دهد و می‌تواند اطلاعاتی در ارتباط با میزان محتوی رطوبتی در زمان‌های مختلف یا آهنگ خروج رطوبت از ماده غذایی طی این فرایند و همچنین، شناخت پارامترهای مهم و موثر در فرایند مانند ضریب انتشار موثر رطوبت را فراهم کند [13]. بنابراین، برای بررسی بهتر تغییرات کمی و کیفی محصول سرخ‌شده، مدل‌سازی محتوی رطوبتی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق حائز اهمیت می‌باشد.

علاوه‌براین، مطالعه درباره ضریب انتشار موثر رطوبت برای بررسی تاثیر پیش‌تیمارهای به‌کاررفته بر میزان از دست‌دادن آب و جذب روغن ضروری می‌باشد. ضریب انتشار موثر رطوبت، یک خصوصیت انتقال کلی است که همه مکانیسم‌های ممکن حرکت رطوبت در ماده غذایی (مانند انتشار مایع، انتشار بخار و جریان موئینگی) را توصیف می‌کند [14].

در مطالعات انجام‌شده توسط محققان مختلف، به‌منظور مدل‌سازی محتوی رطوبتی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، مدل‌سازی با سطوح مختلفی از پیچیدگی صورت گرفته است. با این حال، در اغلب روش‌های مورد استفاده، فرض شده است که خروج رطوبت توسط تئوری انتقال جرم و از طریق مکانیزم‌های انتشار داخلی کنترل می‌شود [15، 16، 17]. همچنین، در میان مدل‌های گزارش‌شده در منابع، مدل حاصل از قانون دوم انتشار فیک بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته است.

کروکیدا و همکاران (2000b)، داده‌های آزمایشی محتوی رطوبتی قطعات سیب‌زمینی را با یک مدل تجربی برازش نمودند (جدول 5، مدل 2). نتایج نشان داد که این مدل تجربی، داده‌های آزمایشی را به‌طور صحیحی برازش می‌کند [18]. علاوه‌براین، براوو و همکاران (2009)، به‌منظور مدل‌سازی از دست‌دادن آب برای ورقه‌های سیب طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، از قانون دوم فیک جهت به‌دست‌آوردن ضریب انتشار موثر رطوبت استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که از دست‌دادن آب طی فرایند سرخ‌کردن ورقه‌های

سرخ‌کردن عمیق، یک روش پخت سریع است که در آن ماده غذایی در داخل روغن داغ با دمای بالاتر از نقطه جوش آب، به‌طور معمول 150-200 درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور می‌شود [1]. طی این فرایند، در نتیجه به‌کارگیری دماهای بالا، قسمت اعظم آب ماده غذایی به شکل بخار از آن خارج می‌شود و در مقابل، روغن توسط ماده غذایی جذب می‌شود. بنابراین، بررسی میزان از دست‌دادن رطوبت در حین سرخ‌کردن مواد غذایی حائز اهمیت می‌باشد. همچنین، جذب روغن تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب ماده غذایی (تخلخل، میزان رطوبت و مواد جامد اولیه) قرار می‌گیرد [2]. در همین راستا، قطعه‌هایی از ماده غذایی با محتوی رطوبتی اولیه بالاتر، آب بیش‌تری طی فرایند از دست داده و روغن بیش‌تری جذب می‌کنند [3، 4].

استفاده از پیش‌تیمار خشک‌کردن قبل از سرخ‌کردن می‌تواند روشی برای بهبود خصوصیات مواد غذایی سرخ‌شده باشد. پیش‌تیمار خشک‌کردن، محتوی آب اولیه ماده غذایی را کاهش داده (افزایش محتوی ماده جامد اولیه) و از این طریق، منجر به کاهش زمان فرایند می‌شود و در نتیجه، جذب روغن در حین سرخ‌کردن را محدود خواهد کرد [5].

علاوه‌بر خشک‌کردن، استفاده از مافوق‌صوت به‌عنوان یک پیش‌تیمار قبل از سرخ‌کردن عمیق می‌تواند مورد توجه قرارگیرد. تاکنون از فناوری مافوق‌صوت در فرایندهای مختلفی مانند خشک‌کردن، انجماد، رفع انجماد، پاستوریزاسیون، امولسیون‌سازی، برش‌دادن، کف‌زدایی، تعیین ترکیبات تشکیل‌دهنده یک ماده غذایی و استخراج برخی از اجزاء ماده غذایی استفاده گردیده است [6، 7، 8]. امواج مافوق صوت، با ایجاد انقباض و انبساط‌های متوالی (اثر اسفنجی¹) در ماده غذایی، باعث تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و سهولت خروج آب از داخل محصول از طریق این کانال‌ها می‌شوند [9، 10]. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که استفاده از مافوق صوت به‌عنوان پیش‌تیمار قبل از فرایند سرخ‌کردن، باعث افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت و کاهش زمان سرخ‌کردن و در نتیجه، منجر به بهبود خصوصیات کیفی محصول سرخ‌شده شود [11، 12].

1. Sponge effect

سیب، می‌تواند به خوبی توسط این مدل پیش‌بینی شود. با افزایش دما، ضریب انتشار موثر رطوبت

نمونه‌ها افزایش یافت و محدوده به‌دست‌آمده برای آن بین $17/71 \times 10^{-9} - 10/7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ بود [13].

تاکنون و بر اساس اطلاعات موجود، در ارتباط با تاثیر فناوری مافوق‌صوت بر محتوی رطوبتی ماده غذایی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، تحقیقی صورت نگرفته است و این پژوهش، با هدف بررسی تاثیر این پیش‌تیمار به همراه تلفیق آن با پیش‌تیمار خشک‌کردن بر محتوی رطوبتی، ضریب انتشار موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق و هم‌چنین، مدل‌سازی محتوی رطوبتی طی این فرایند انجام شد.

2-3- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای انجام هر آزمایش، سیب‌زمینی‌ها پس از شستشو و پوست‌گیری، توسط یک کاتر دستی طراحی‌شده به ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2 \text{ cm}$ (ارتفاع \times عرض \times طول)، به قطعه‌های مکعب مستطیلی برش داده شدند. نمونه‌های برش‌داده‌شده، جهت جلوگیری از اتلاف رطوبت در درون یک پلیت قرار گرفته و قبل از سرخ‌کردن، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شسته شدند. آب اضافی سطحی نیز توسط یک کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. از این مرحله به بعد، نمونه‌ها بر حسب انجام نوع پیش‌تیمار، به 9 دسته تقسیم شدند (جدول 1).

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد

در این تحقیق، سیب‌زمینی و روغن مایع به‌عنوان مواد خام، مورد استفاده قرار گرفتند. سیب‌زمینی (رقم آگریا) از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایشات، در سردخانه بالای صفر (12 درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد. روغن مورد استفاده در این مطالعه، روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه با نام تجاری بهار) بود.

2-2- تجهیزات

در تحقیق حاضر، از یک سرخ‌کن خانگی (مدل F430.R، ظرفیت 2/2 لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده $150-190 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)، خشک‌کن سینتیک‌دار طراحی‌شده در مقیاس آزمایشگاهی (مدل UOP 8 Tray dryer, Armfield, UK، مجهز به سیستم ثبت خودکار داده‌ها، واحد کنترل‌کننده دما: $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ و سرعت جریان هوا: $\pm 0/1 \text{ m/s}$) برای انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن، دستگاه حمام مافوق‌صوت (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم بسامد: $\pm 1 \text{ kHz}$ و زمان اولتراسونیکاسیون) و آون (مدل BM120، 120 لیتری، ساخت ایران، شرکت فن آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا، $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) برای اندازه‌گیری

2-4- شرایط سرخ‌کردن

در هر آزمایش پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (بر اساس جدول 1)، جهت سرخ‌کردن آن‌ها، ابتدا سرخ‌کن با 1/5 لیتر روغن پر شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن موردنظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به‌طوری‌که پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای موردنظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به میزان 100-120 گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند و سپس، سبد حاوی نمونه‌ها، به‌طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ‌شدن نمونه‌ها به‌مدت زمان موردنظر، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شدند و روغن اضافی آن‌ها توسط یک کاغذ جاذب گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه بر روی آن‌ها انجام گرفت. تمامی آزمایش‌ها با 2 تکرار انجام شد و داده‌های گزارش‌شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

2-5- محتوی رطوبتی

محتوی رطوبت نمونه‌های سرخ‌شده، از طریق خشک‌کردن آن‌ها در آون کنوکسیون در دمای $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد [19] و در نهایت بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

2-6- مدل‌سازی ریاضی

در این تحقیق، مدل‌سازی محتوی رطوبتی قطعات

تعیین بهترین مدل، از دو معیار ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا¹ (RMSE) استفاده شد. با توجه به این دو معیار، مدلی که دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تر بود، به‌عنوان مدل بهتر انتخاب شد. هم‌چنین، به‌منظور یافتن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرایند سرخ کردن (زمان پیش‌تیمار خشک کردن، بسامد پیش‌تیمار مافوق صوت و دمای فرایند سرخ کردن)، از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره² در نرم افزار Microsoft Excel 2007 استفاده شد و معیار ضریب همبستگی (R^2) برای انتخاب بهترین رابطه در نظر گرفته شد [11، 12].

2-7- آنالیز آماری

در این مطالعه، 9 تیمار نشان داده شده در جدول 1، در سه دمای 150، 170 و 190°C و چهار زمان 60، 120، 180 و 240 ثانیه سرخ شدند و کلیه آزمایشات در دو تکرار ($9 \times 3 \times 4 \times 2 = 216$) انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 انجام شد. هم‌چنین، برای انجام مقایسه میانگین از آزمون بونفرونی³ در سطح احتمال 5/100 (p < 0/05) استفاده شد [22].

3- نتایج و بحث

3-1- محتوی رطوبتی

مطابق شکل 1، در تمامی دماهای مورد استفاده، با افزایش زمان سرخ کردن، نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند؛ به طوری که کاهش نسبت محتوی رطوبتی در فواصل زمانی اولیه، به دلیل وجود محتوی رطوبتی سطحی بالا، یک رفتار نمایی را نشان می‌دهد و آهنگ از دست دادن رطوبت توسط قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (از 60 به 240 ثانیه) کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط بسیاری از محققان در مطالعه بر روی انواعی از مواد غذایی سرخ شده گزارش شده است [14، 16، 23، 24]. هم‌چنین، در بررسی اثر دما بر محتوی رطوبتی نمونه‌های شاهد، در تمامی زمان‌های سرخ کردن یکسان، با افزایش دما از 150 به 190°C، آهنگ

سیب‌زمینی طی فرایند سرخ کردن عمیق، بر حسب زمان صورت گرفت و از شش مدل تجربی استفاده شد (جدول 5). هم‌چنین، داده‌های آزمایشی محتوی رطوبتی بر اساس قانون دوم فیک (معادله 1) به‌منظور به دست آوردن مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت برازش شدند [20].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{\lambda}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^2} \exp\left(-\frac{(n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (1)$$

MR: نسبت محتوی رطوبتی (بدون بُعد)

M_t : محتوی رطوبتی در لحظه t ام (گرم آب بر گرم ماده جامد بدون روغن)

M_0 : محتوی رطوبتی اولیه (گرم آب بر گرم ماده جامد بدون روغن)

M_e : محتوی رطوبتی تعادلی (گرم آب بر گرم ماده جامد بدون روغن)

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

L: نصف ضخامت نمونه (m)

t: زمان سرخ کردن (s)

با فرض این که محتوی رطوبتی تعادلی ناچیز می‌باشد ($M_e = 0$)، رابطه 1 به صورت زیر ساده می‌شود [14، 21].

$$MR = \frac{M_t}{M_0} = \frac{\lambda}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (2)$$

بر طبق رابطه 2، می‌توان ضریب انتشار موثر رطوبت را از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت محتوی رطوبتی (MR) در مقابل زمان (t) فرایند سرخ کردن محاسبه کرد. علاوه بر این، به منظور بررسی تغییرات ضریب انتشار موثر رطوبت با دمای سرخ کردن، از رابطه آرنیوس (معادله 3) استفاده شد و انرژی فعال‌سازی نیز محاسبه گردید [14].

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

از طرف دیگر، پارامترهای مربوط به مدل‌های استفاده شده (جدول 5)، از طریق برازش کردن داده‌های آزمایشی محتوی رطوبتی با آن‌ها، در نرم افزارهای MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) و Maple (Version 15.00, 2011) به دست آمدند. برای

1. Root Mean Square Error

2. Multiple regression analysis

3. Bonferroni

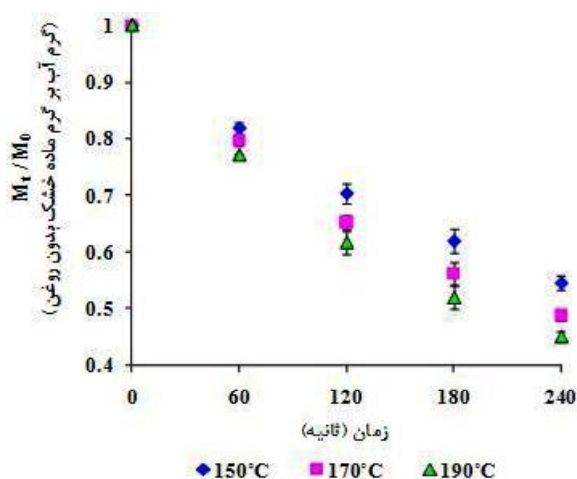
محتوی رطوبتی معین، از طریق کاربرد مافوق صوت کاهش پیدا کند. هم‌چنین، برای نمونه‌های پیش‌تیمارشده با خشک‌کردن (8 و 15 دقیقه) و سپس سرخ‌شده در دمای 150°C (شکل 2-الف)، کاهش در نسبت محتوی رطوبتی در مقایسه با نمونه شاهد، در تطابق با نتایج به‌دست‌آمده توسط گوپتا و همکاران (2000) و کروکیدا و همکاران (2001) می‌باشد [5، 25]. این مسئله را می‌توان به کاهش بخشی از محتوی رطوبتی نمونه‌ها طی انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن نسبت داد.

شکل 2-ب، تغییرات نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (در بسامدهای 28 و 40 کیلوهرتز) و خشک‌کردن (8 و 15 دقیقه) به‌صورت تلفیقی (بر اساس جدول 1) و سپس سرخ‌شده در دمای 150°C را نشان می‌دهد. برطبق نتایج به‌دست‌آمده، نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌های پیش‌تیمارشده به‌صورت تلفیقی، نسبت به نمونه‌های شاهد، کاهش معنی‌داری را نشان داد؛ به‌طوری‌که نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (28 و 40 کیلوهرتز) و خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه، کم‌ترین میزان نسبت محتوی رطوبتی را داشتند. مشابه شکل 1 (الف)، کاهش محتوی رطوبتی نمونه‌های پیش‌تیمارشده به‌صورت تلفیقی نسبت به نمونه شاهد را می‌توان به اثر پیش‌تیمار مافوق صوت در ایجاد کانال‌های میکروسکوپی و سهولت خروج آب از نمونه‌ها طی پیش‌تیمار خشک‌کردن بعدی نسبت داد؛ به‌طوری‌که با ادامه خروج رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ‌کردن، در نهایت محتوی رطوبت پایین‌تری را خواهند داشت.

علاوه‌براین، شکل 2 (ج، د)، تغییرات نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌های پیش‌تیمارشده در شرایط مختلف (به‌صورت مجزا و تلفیقی) و سپس سرخ‌شده در دمای 170°C را نشان می‌دهد. مطابق این دو شکل، روند داده‌های آزمایشی به‌دست آمده در تیمار شاهد و هم‌چنین، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت و خشک‌کردن به‌صورت مجزا و تلفیقی، مشابه روند داده‌های آزمایشی به‌دست آمده در دمای 150°C می‌باشد. از طرف دیگر، مطابق شکل 2 (ه، و)، روند کاهش نسبت محتوی رطوبتی در تمامی تیمارهای سرخ‌شده در 190°C ، مشابه روند داده‌های آزمایشی به‌دست آمده در دماهای 150 و 170°C می‌باشد. هم‌چنین، قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با

خروج رطوبت به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد (شکل 1). روند مشابهی نیز در مورد سایر نمونه‌ها (پیش‌تیمارشده با مافوق صوت و خشک‌کردن به‌صورت مجزا و تلفیقی) مشاهده شد (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).

شکل 2-الف، منحنی تغییرات نسبت محتوی رطوبتی در زمان‌های مختلف، در تیمار شاهد و هم‌چنین نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (در بسامدهای 28 و 40 کیلوهرتز) و خشک‌کردن (در زمان‌های 8 و 15 دقیقه) به‌صورت مجزا و سپس سرخ‌شده در دمای 150°C را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست آمده، با افزایش زمان سرخ‌کردن، نسبت محتوی رطوبتی در تمامی نمونه‌های فوق کاهش پیدا کرد؛ به‌طوری‌که در زمان‌های سرخ‌کردن یکسان، نمونه‌های شاهد در مقایسه با چهار پیش‌تیمار انجام‌شده، بیش‌ترین نسبت محتوی رطوبتی را داشتند. علاوه‌براین، مقایسه بین این پیش‌تیمارها نشان می‌دهد که در ثانیه‌های 60 یا 120 از زمان سرخ‌کردن، پیش‌تیمار خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه، کم‌ترین میزان نسبت محتوی رطوبتی را دارد. در ادامه فرایند و با افزایش زمان سرخ‌کردن (180 تا 240 ثانیه)، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (در بسامدهای 28 و 40 کیلوهرتز)، کم‌ترین میزان نسبت محتوی رطوبتی را نشان دادند. قابل ذکر است که کاهش در نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (28 و 40 کیلوهرتز) نسبت به نمونه شاهد، از لحاظ آماری معنی‌دار بود. علاوه‌براین، کاهش در محتوی رطوبتی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه نسبت به نمونه شاهد، طی سرخ‌کردن در دمای 150°C ، از لحاظ آماری غیرمعنی‌دار بود؛ در حالی‌که این کاهش در مورد نمونه‌های پیش‌تیمارشده با خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه، معنی‌دار بود. مطابق شکل 1-الف، کاهش در نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت نسبت به نمونه شاهد را می‌توان به ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در قطعات سیب‌زمینی طی انجام پیش‌تیمار با مافوق صوت نسبت داد؛ به‌طوری‌که حین سرخ‌کردن نمونه‌ها در روغن، رطوبت با سهولت بیش‌تری از آن‌ها خارج می‌شود و در نتیجه، محتوی رطوبتی نهایی پایین‌تری را خواهند داشت. علاوه‌براین، می‌توان بیان کرد که زمان سرخ‌کردن می‌تواند جهت دستیابی به یک

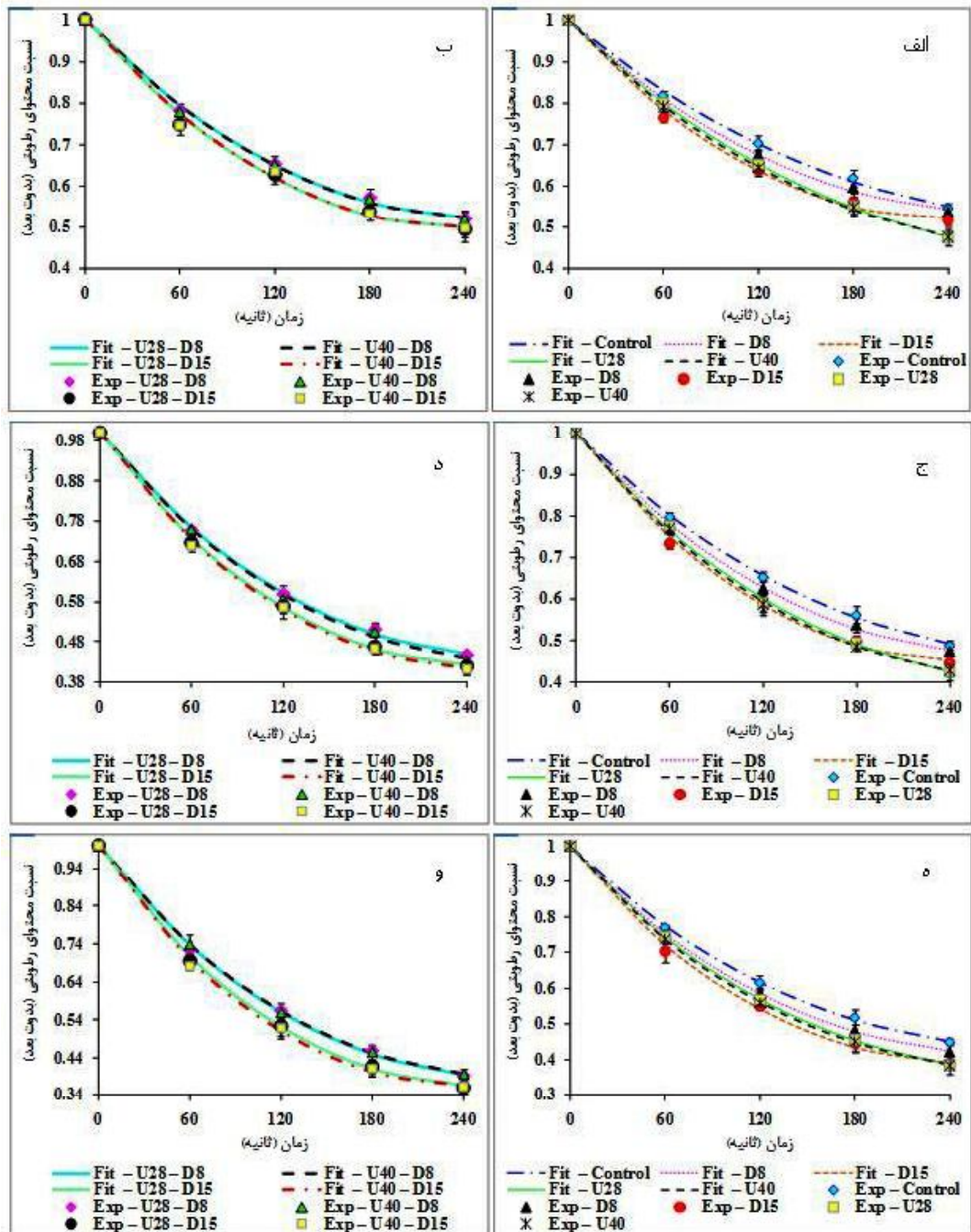


شکل (1) نسبت محتوی رطوبتی (بدون بعد) قطعات سیبزمینی (نمونه شاهد) سرخ‌شده در دماهای مختلف، به‌عنوان تابعی از زمان سرخ‌کردن، M_0 و M_t ، به‌ترتیب نشان‌دهنده محتوی رطوبتی اولیه و محتوی رطوبتی در زمان t از فرایند سرخ‌کردن (گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن) می‌باشند.

جدول (1) علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	1
D_8	خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه	2
D_{15}	خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه	3
U_{28}	فراصوت با فرکانس 28 کیلوهرتز	4
U_{40}	فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز	5
$U_{28} - D_8$	فراصوت با فرکانس 28 کیلوهرتز - خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه	6
$U_{40} - D_8$	فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز - خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه	7
$U_{28} - D_{15}$	فراصوت با فرکانس 28 کیلوهرتز - خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه	8
$U_{40} - D_{15}$	فراصوت با فرکانس 40 کیلوهرتز - خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه	9

1: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دما و زمان مورد نظر سرخ شدند.
 2 و 3: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن، در دستگاه خشک‌کن سینی‌دار، در دمای 80°C ، زمان‌های 8 و 15 دقیقه و سرعت جریان هوای $1/5$ متر بر ثانیه به‌طور مجزا قرار گرفتند.
 4 و 5: نمونه‌هایی که جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در دستگاه حمام مافوق صوت در معرض بسامدهای 28 و 40 کیلوهرتز و مدت زمان 15 دقیقه به‌طور مجزا قرار گرفتند.
 6، 7، 8 و 9: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش‌تیمارهای مافوق صوت و خشک‌کردن، ابتدا در دستگاه حمام مافوق صوت در معرض بسامدهای 28 و 40 کیلوهرتز و مدت زمان 15 دقیقه به‌طور مجزا قرار گرفتند و سپس در دستگاه خشک‌کن سینی‌دار، در دمای 80°C ، زمان‌های 8 و 15 دقیقه و سرعت جریان هوای $1/5$ متر بر ثانیه به‌طور مجزا خشک شدند.



شکل (2) تغییرات نسبت محتوای رطوبتی (MR) حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل 5 (جدول 2)، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای 150°C (الف، ب)، 170°C (ج، د)، و 190°C (ه، و)، در پیش‌تیمارهای مختلف، بر اساس جدول 1

موثر رطوبت تمامی نمونه‌های پیش‌تیمارشده (به‌صورت مجزا و تلفیقی) و سپس سرخ‌شده در دمای 170°C ، نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری بالاتر بود (جدول 2). علاوه‌براین، مقایسه بین مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده و سپس سرخ‌شده در 190°C ، نشان‌دهنده وجود روند مشابهی با روند داده‌های مرتبط با 170°C می‌باشد.

مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب انتشار موثر رطوبت در این تحقیق، با مقادیر گزارش‌شده توسط محققان دیگر دشوار می‌باشد؛ زیرا، مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت نمونه‌های سرخ‌شده، تحت تاثیر عواملی مانند نوع فرایند سرخ‌کردن (تحت فشار اتمسفری یا خلا)، نوع ماده غذایی، دما و زمان سرخ‌کردن، شکل، ضخامت نمونه و پیش‌تیمار(های) انجام‌شده تغییر می‌کند [13، 14، 17، 21، 25]. مطابق جدول 3، مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت به‌دست آمده در تحقیق حاضر، در محدوده مقادیر گزارش‌شده توسط پدرسچی و همکاران (2005) بوده [17] و همچنین، نزدیک به مقادیر به‌دست آمده توسط دهقان نصیری و همکاران (2011) می‌باشد [21]. با این حال، نسبت به مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت محاسبه‌شده توسط رایس و گامبل (1989)، براوو و همکاران (2009) و ترانکوزو و پدرسچی (2009) بالاتر بوده است [13، 14، 26]. این تفاوت، می‌تواند نتیجه استفاده از محدوده دمایی بالاتر (150°C تا 190°C) در این تحقیق باشد؛ زیرا با افزایش دمای سرخ‌کردن، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت نیز افزایش پیدا می‌کند و می‌توان بیان کرد که دمای سرخ‌کردن، از عوامل اصلی تاثیرگذار بر روی میزان ضریب انتشار موثر رطوبت محصول سرخ‌شده است. علاوه‌براین، مطابق نتایج ذکرشده در قبل، پیش‌تیمارهای انجام‌شده در این تحقیق (مافوق صوت و خشک‌کردن)، به‌طور معنی‌داری مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت را نسبت به نمونه شاهد تغییر دادند که این مسئله می‌تواند دلیل دیگری برای این اختلافات باشد. از طرف دیگر، استفاده از زمان‌های سرخ‌کردن به‌طور نسبی کوتاه‌تر در تحقیق حاضر (با توجه به عدم رسیدن به محتوی رطوبتی پایین یا محتوی رطوبتی نزدیک به محتوی رطوبتی تعادلی) نیز، می‌تواند یکی دیگر از دلایل موجود برای این تفاوت باشد.

خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه، بیش‌ترین کاهش در نسبت محتوی رطوبتی را نشان دادند؛ اگرچه در زمان‌های 180 و 240 ثانیه از فرایند سرخ‌کردن، اختلاف معنی‌داری بین نمونه‌های پیش‌تیمارشده با خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه و نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (28 و 40 کیلوهرتز) مشاهده نشد.

3-2- ضریب انتشار موثر رطوبت

مطابق جدول 2، در دماهای سرخ‌کردن یکسان، مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده (به‌صورت مجزا و تلفیقی) نسبت به نمونه شاهد بالاتر می‌باشد. همچنین، با افزایش دما، مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت تمامی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. علاوه‌براین، مقایسه بین پیش‌تیمارهای انجام‌شده در دمای 150°C ، نشان می‌دهد که نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (28 و 40 کیلوهرتز) دارای بالاترین میزان ضریب انتشار موثر رطوبت هستند. در ارتباط با نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت، افزایش معنی‌دار در مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت نسبت به نمونه شاهد را می‌توان به ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در قطعات سیب‌زمینی طی انجام پیش‌تیمار نسبت داد؛ به‌طوری‌که این امر باعث می‌شود که طی فرایند سرخ‌کردن، رطوبت با سهولت و سرعت بیش‌تری از نمونه‌ها خارج شود و در نتیجه، میزان ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش یابد. از طرف دیگر، در مورد نمونه‌های پیش‌تیمارشده با خشک‌کردن، افزایش در میزان ضریب انتشار موثر رطوبت نسبت به نمونه شاهد، در تطابق با نتایج به‌دست آمده توسط ترانکوزو و پدرسچی (2009) می‌باشد. این مسئله، نتیجه اثر قابل توجه پیش‌تیمار خشک‌کردن بر روی از دست‌دادن رطوبت توسط نمونه غذایی طی فرایند سرخ‌کردن می‌باشد [14].

علاوه‌براین، مطابق جدول 2 و در ارتباط با مقایسه بین مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده و سپس سرخ‌شده در 170°C ، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با مافوق صوت (28 و 40 کیلوهرتز) و خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه به‌صورت تلفیقی، دارای بالاترین میزان ضریب انتشار موثر رطوبت هستند. همچنین، از لحاظ آماری، میزان ضریب انتشار

جدول (2) مقادیر متوسط ضریب انتشار موثر رطوبت (m^2/s)، برای نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده و سپس سرخ‌شده در دماهای مختلف

اولتراسوند*	خشک کردن**	دما ($^{\circ}C$)	Deff ($\times 10^{-8}$)
3	3	190	$6/200 \pm 1/03E-09^a$
2	3	190	$6/200 \pm 1/03E-09^a$
3	1	190	$5/836 \pm 9/60E-10^b$
2	1	190	$5/836 \pm 9/60E-10^b$
1	3	190	$5/763 \pm 2/00E-09^b$
3	2	190	$5/690 \pm 6/02E-10^b$
2	2	190	$5/690 \pm 6/02E-10^b$
3	3	170	$5/398 \pm 1/03E-09^c$
2	3	170	$5/325 \pm 2/06E-09^c$
1	2	190	$5/252 \pm 4/03E-10^{cd}$
2	1	170	$5/252 \pm 4/03E-10^{cd}$
3	1	170	$5/179 \pm 1/72E-11^{cd}$
3	2	170	$5/033 \pm 1/06E-09^{de}$
2	2	170	$4/887 \pm 1/70E-10^e$
1	3	170	$4/887 \pm 1/70E-10^e$
1	1	190	$4/814 \pm 1/03E-09^{ef}$
1	2	170	$4/595 \pm 9/06E-10^{fg}$
2	1	150	$4/522 \pm 1/60E-10^{gh}$
3	1	150	$4/522 \pm 1/60E-10^{gh}$
1	1	170	$4/304 \pm 1/03E-09^{hi}$
3	3	150	$4/158 \pm 6/03E-11^{ij}$
2	3	150	$4/158 \pm 6/03E-11^{ij}$
2	2	150	$3/939 \pm 2/00E-10^{jk}$
3	2	150	$3/939 \pm 2/00E-10^{jk}$
1	3	150	$3/939 \pm 2/00E-10^{jk}$
1	2	150	$3/720 \pm 1/02E-09^{kl}$
1	1	150	$3/575 \pm 1/03E-09^l$

* در ارتباط با مافوق صوت، اعداد 1، 2 و 3 به ترتیب نشان‌دهنده عدم انجام مافوق صوت، مافوق صوت با بسامد 28 کیلوهرتز و مافوق صوت با بسامد 40 کیلوهرتز می‌باشند.

** در ارتباط با خشک‌کردن، اعداد 1، 2 و 3 به ترتیب نشان‌دهنده عدم انجام خشک‌کردن، خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه و خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه می‌باشند.

*** حروف لاتین متفاوت در یک ستون، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5٪ می‌باشد.

جدول (3) مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی برای چند نمونه غذایی سرخ‌شده در شرایط مختلف فرایند سرخ‌کردن عمیق

منبع	Ea (kJ/mol)	Deff (m ² /s)	پیش‌تیمار	نوع فرایند	زمان (ثانیه)	دما (°C)	اندازه	ماده غذایی
Rice & Gamble, 1989	24/2	080×10 ⁻⁸ - 135×10 ⁻⁸	---	A.F	30 - 300	185, 165, 145	ضخامت 1/5 mm	چیپس سیب‌زمینی
Pedreschi et al., 2005	37 - 50/2	130×10 ⁻⁸ - 980×10 ⁻⁹	آنزیم بری و خشک‌کردن	A.F	*	180 و 150, 120	ضخامت 2/5 mm و قطر 37 mm	چیپس سیب‌زمینی
Bravo et al., 2009	25/4	107×10 ⁻⁹ - 177×10 ⁻⁹	---	A.F	30 - 150	170, 160, 150, 140	ضخامت 2 mm	چیپس سیب‌زمینی
Troncoso & Pedreschi, 2009	23/50 - 29/30	857×10 ⁻⁹ - 295×10 ⁻⁸	آنزیم بری و خشک‌کردن	A.F	*	180, 140, 130, 120	ضخامت 3 mm و قطر 30 mm	چیپس سیب‌زمینی
Dehghan-Nasiri et al., 2011	18/42 - 23/84	205×10 ⁻⁸ - 571×10 ⁻⁸	---	A.F V.F	60 - 300	190 و 170, 150	4/7×3/5×1/5 cm (ارتفاع×عرض×طول)	ناگت میگو
Present study	10/37 - 16/32	357×10 ⁻⁸ - 620×10 ⁻⁸	اولتراسوند و خشک‌کردن	A.F	60 - 240	190 و 170, 150	4×1/2×1/2 cm (ارتفاع×عرض×طول)	قطعات سیب‌زمینی

* سرخ کردن تا رسیدن به محتوای رطوبت نهایی تقریباً 1/8 درصد (بر پایه مرطوب).
A.F و V.F: به ترتیب، نشان‌دهنده سرخ‌کردن تحت فشار اتمسفری و تحت خلا می‌باشند.
Ea و Deff: به ترتیب، نشان‌دهنده ضریب انتشار موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی می‌باشند.

جدول (4) مقادیر متوسط انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)، برای نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده و سپس سرخ‌شده در دماهای مختلف

اولتراسوند*	خشک کردن**	انرژی فعال‌سازی
3	3	16/324±2/16 ^a
2	3	16/307±2/11 ^a
1	3	15/495±0/74 ^a
3	2	15/024±0/95 ^{ab}
2	2	14/988±2/35 ^{ab}
1	2	15/075±1/20 ^{ab}
1	1	12/161±2/32 ^{bc}
2	1	10/389±1/70 ^c
3	1	10/372±1/65 ^c

*, ** و *** مطابق جدول 1

3-3- انرژی فعال‌سازی

آرنیوس)، دمای فرایند سرخ‌کردن، از عوامل اصلی تاثیرگذار بر روی ضریب انتشار موثر رطوبت و در نتیجه، روی مقدار انرژی فعال‌سازی می‌باشد. در واقع، با افزایش دمای سرخ‌کردن (به ویژه در دماهای بالا)، به دلیل افزایش آهنگ خروج رطوبت از ماده غذایی و در نتیجه، افزایش میزان ضریب انتشار موثر رطوبت، مقدار انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای خارج شدن آب از قطعات سیب‌زمینی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

3-4- مدل‌سازی

جدول 5، مدل‌های مورد استفاده برای برازش داده‌های آزمایشی نسبت محتوی رطوبتی با آن‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکل 2، منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌های مختلف (بر اساس جدول 1) سرخ‌شده در چهار زمان 60، 120، 180 و 240 ثانیه و سه دمای 150، 170 و 190°C را با مدل 6 (جدول 5) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل تجربی به کاررفته، با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین (جدول 6، مدل 6)، به خوبی داده‌های آزمایشی نسبت محتوی رطوبتی را برازش نموده است. هم‌چنین، مطابق نتایج به دست‌آمده و بر حسب دو معیار R^2 و RMSE، همه مدل‌های تجربی استفاده‌شده، به خوبی داده‌های آزمایشی نسبت محتوی رطوبتی را برازش نمودند (جدول 6). با این حال، مدل 6 (جدول 6)، به دلیل داشتن پارامترهای آماری، کمی بهتر ($R^2 > 0/999$ در اکثر موارد و RMSE پایین‌تر) به منظور برازش داده‌های آزمایشی نسبت محتوی رطوبتی نمونه‌ها با آن انتخاب شد. در مرحله بعد، به منظور به دست آوردن مدل‌های دارای قابلیت کاربرد در شرایط زمانی مختلف و هم‌چنین برای تیمارهای مختلف در یک دمای مشخص، نسبت محتوی رطوبتی بر حسب زمان مدل‌سازی شد (جدول 7). علاوه بر این، در مرحله بعد با هدف به دست آوردن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرایند سرخ‌کردن (زمان پخت تیمار خشک‌کردن، بسامد پیش‌تیمار مافوق صوت و دمای فرایند سرخ‌کردن)، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره بر روی ضرایب تمامی مدل‌های مربوطه انجام گرفت [11]، [12]. جدول 8، مدل‌های به دست‌آمده از این طریق را نشان

مطابق جدول 4، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با مافوق صوت و خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه به صورت تلفیقی، دارای بالاترین میزان انرژی فعال‌سازی هستند. هم‌چنین، مقدار انرژی فعال‌سازی نمونه‌های تنها پیش‌تیمار شده با مافوق صوت، نسبت به نمونه شاهد پایین‌تر است؛ ولی این کاهش از لحاظ آماری غیرمعنی‌دار می‌باشد. در این ارتباط می‌توان بیان کرد که در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با مافوق صوت، تسهیل خروج رطوبت از نمونه‌ها طی فرایند سرخ‌کردن، باعث کاهش میزان انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای خروج رطوبت شده است.

علاوه بر این، مطابق جدول 4، مقدار انرژی فعال‌سازی نمونه‌های تنها پیش‌تیمار شده با خشک‌کردن (8 و 15 دقیقه) نسبت به نمونه شاهد بالا تر است؛ به طوری که این مسئله از لحاظ آماری در مورد قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه غیرمعنی‌دار بوده، ولی در ارتباط با نمونه‌های پیش‌تیمار شده با خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه، معنی‌دار می‌باشد. این یافته با نتایج به دست‌آمده توسط ترانکوزو و پدرسچی (2009) مطابقت دارد [14]. این مسئله را می‌توان به محتوی رطوبت اولیه پایین‌تر نمونه‌های پیش‌تیمار شده با خشک‌کردن در مقایسه با نمونه شاهد نسبت داد. در واقع، با توجه به رابطه معکوس بین محتوی رطوبتی و انرژی فعال‌سازی، می‌توان بیان کرد که مقادیر انرژی فعال‌سازی بالا، به طور معمول در مواد با محتوی رطوبت پایین، به دست می‌آید [27]؛ به طوری که در محتوی رطوبتی پایین‌تر، میزان انرژی فعال‌سازی مورد نیاز جهت خروج رطوبت از ماده غذایی طی فرایند سرخ‌کردن افزایش پیدا می‌کند.

به منظور مقایسه مقادیر انرژی فعال‌سازی محاسبه‌شده در این تحقیق با مقادیر گزارش شده توسط محققان دیگر، باید به عوامل موثر بر میزان انرژی فعال‌سازی (مانند دما و زمان سرخ‌کردن، نوع ماده غذایی و پیش‌تیمارهای انجام‌شده) توجه کرد. در این ارتباط (مطابق جدول 3)، مقادیر کم‌تر انرژی فعال‌سازی به دست‌آمده در تحقیق حاضر را می‌توان به اختلاف در شرایط فرایند سرخ‌کردن به کاررفته (دما، زمان و پیش‌تیمارهای انجام‌شده) نسبت داد. برای مثال، مطابق معادله 3 (معادله

4. اصلاح شده مدل پیشنهاد شده توسط کروکیدا و همکاران (2001a) بود می‌کند [23]. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که این مدل تجربی، داده‌های آزمایشی را به‌طور صحیحی برازش می‌کند [28].

$$MR = a \cdot \exp(-b \cdot t) \quad (5)$$

4- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که پیش‌تیمارهای مافوق صوت و خشک کردن در زمان 15 دقیقه به‌صورت مجزا، محتوی رطوبتی را به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهند. همچنین، در نمونه‌های پیش‌تیمار شده به‌صورت تلفیقی، کاهش در محتوی رطوبتی نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. علاوه بر این، محدوده به‌دست‌آمده برای ضریب انتشار موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی، به‌ترتیب برابر با $10/37 - 16/32$ kJ/mol و $3/57 \times 10^{-8} - 6/20 \times 10^{-8}$ بود. از طرف دیگر، تمامی مدل‌های تجربی مورد استفاده در این تحقیق، به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش نمودند. همچنین، مدل‌های حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره پیشنهاد گردید.

می‌دهد؛ به‌طوری که نسبت محتوی رطوبتی به‌عنوان تابعی از زمان سرخ کردن بوده و ضرایب مدل‌ها (a، b، یا c) نیز، تابعی از متغیرهای فرایند می‌باشند. با استفاده از چنین مدل‌هایی می‌توان زمان مناسب برای دستیابی به یک نمونه سرخ شده با میزان رطوبت معین و مناسب را به‌دست آورد و نمونه غذایی را تنها تا زمان مورد نظر سرخ کرد. از طرف دیگر، با به‌دست آوردن چنین مدل‌هایی، لزوم انجام آزمایشات پرهزینه در شرایط مختلف ذکر شده در فرایند سرخ کردن، بسیار کاهش پیدا می‌کند و این مسئله، بیانگر اهمیت بالای چنین مدل‌هایی می‌باشد [11، 12].

در تطابق با نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر، مٹ و همکاران (2004)، داده‌های آزمایشی محتوی رطوبتی پاپاد را با مدل کروکیدا و همکاران (2000a) با انجام اصلاحاتی در آن (رابطه 4)، برازش نمودند [16].

$$MR = a \cdot \exp(-b \cdot t) + c \quad (4)$$

نتایج این مطالعه نشان داد که این مدل تجربی (رابطه 4)، داده‌های آزمایشی را به خوبی برازش می‌کند ($R^2=0/99$). علاوه بر این، ان‌گدی و همکاران (2007)، در مطالعه بر روی ناگت جوجه، داده‌های آزمایشی محتوی رطوبتی را با یک مدل سینتیکی (رابطه 5)، برازش نمودند. این مدل، همانند رابطه

جدول (5) مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات نسبت محتوی رطوبتی (MR) قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (t)، طی فرایند سرخ کردن عمیق

شماره	مدل	مرجع
1	$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{\lambda}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(\gamma n + 1)^2} \exp\left(\frac{-(\gamma n + 1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$	Crank, 1975
2	$MR = \exp(-a \cdot t)$	Krokida et al, 2000a
3	$MR = a \cdot b^x$	مطالعه حاضر
4	$MR = \frac{\lambda}{a \cdot t + b}$	مطالعه حاضر
5	$MR = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$	مطالعه حاضر
6	$MR = \frac{\exp(-a \cdot t)}{1 - b \cdot t}$	مطالعه حاضر
7	$MR = \frac{t + a}{b \cdot t + a}$	مطالعه حاضر

جدول (6) پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های 1-7 موجود در جدول 5، برای تیمارها و دماهای مختلف طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی

دما (°C)						مدل (1)
190		170		150		
R ²		R ²		R ²		تیمار
0/9914		0/9878		0/9884		Control
0/9922		0/9925		0/9944		D8
0/9977		0/9966		0/9970		D15
0/9904		0/9847		0/9845		U28
0/9914		0/9859		0/9882		U40
0/9959		0/9940		0/9957		U28 – D8
0/9913		0/9913		0/9958		U40 – D8
0/9959		0/9948		0/9973		U28 – D15
0/9961		0/9963		0/9966		U40 – D15
دما (°C)						مدل (2)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	تیمار
0/0275	0/9842	0/0229	0/9873	0/0219	0/9848	Control
0/0318	0/9813	0/0316	0/9774	0/0320	0/9697	D8
0/0418	0/9708	0/0446	0/9594	0/0451	0/9455	D15
0/0246	0/9901	0/0252	0/9882	0/0184	0/9922	U28
0/0282	0/9870	0/0292	0/9842	0/0233	0/9875	U40
0/0337	0/9808	0/0350	0/9750	0/0380	0/9608	U28 – D8
0/0321	0/9827	0/0336	0/9780	0/0384	0/9600	U40 – D8
0/0401	0/9757	0/0417	0/9684	0/0465	0/9470	U28 – D15
0/0456	0/9686	0/0420	0/9684	0/0467	0/9465	U40 – D15
دما (°C)						مدل (3)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	تیمار
0/0285	0/9873	0/0234	0/9900	0/0216	0/9889	Control
0/0334	0/9845	0/0327	0/9820	0/0321	0/9771	D8
0/0434	0/9764	0/0458	0/9678	0/0455	0/9584	D15
0/0260	0/9917	0/0273	0/9896	0/0189	0/9938	U28
0/0299	0/9890	0/0316	0/9861	0/0239	0/9900	U40
0/0350	0/9844	0/0363	0/9799	0/0385	0/9698	U28 – D8
0/0342	0/9852	0/0353	0/9817	0/0389	0/9693	U40 – D8
0/0401	0/9757	0/0417	0/9684	0/0465	0/9470	U28 – D15
0/0456	0/9686	0/0420	0/9684	0/0467	0/9465	U40 – D15

ادامه جدول (6)

دما (°C)						مدل (4)
190		170		150		تیمار
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	
0/0037	0/9998	0/0034	0/9998	0/0053	0/9993	Control
0/0072	0/9993	0/0074	0/9991	0/0126	0/9964	D8
0/0064	0/9995	0/0157	0/9962	0/0233	0/9891	D15
0/0136	0/9977	0/0150	0/9969	0/0070	0/9991	U28
0/0118	0/9983	0/0146	0/9970	0/0035	0/9998	U40
0/0032	0/9999	0/0079	0/9990	0/0168	0/9942	U28 – D8
0/0110	0/9985	0/0101	0/9985	0/0172	0/9940	U40 – D8
0/0067	0/9995	0/0112	0/9983	0/0227	0/9905	U28 – D15
0/0090	0/9991	0/0100	0/9987	0/0241	0/9893	U40 – D15
دما (°C)						مدل (5)
190		170		150		تیمار
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	
0/0105	0/9989	0/0095	0/9989	0/0127	0/9975	Control
0/0090	0/9992	0/0109	0/9987	0/0125	0/9977	D8
0/0233	0/9954	0/0188	0/9964	0/0182	0/9956	D15
0/0090	0/9993	0/0085	0/9993	0/0075	0/9994	U28
0/0095	0/9993	0/0056	0/9997	0/0081	0/9992	U40
0/0174	0/9974	0/0141	0/9980	0/0134	0/9976	U28 – D8
0/0082	0/9994	0/0148	0/9978	0/0133	0/9976	U40 – D8
0/0187	0/9973	0/0145	0/9981	0/0208	0/9947	U28 – D15
0/0222	0/9963	0/0186	0/9969	0/0242	0/9928	U40 – D15
دما (°C)						مدل (6)
190		170		150		تیمار
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	
0/0049	0/9996	0/0053	0/9995	0/0090	0/9981	Control
0/0073	0/9993	0/0061	0/9994	0/0089	0/9982	D8
0/0035	0/9998	0/0036	0/9998	0/0010	1	D15
0/0015	1	0/0079	0/9991	0/0033	0/9998	U28
0/0023	0/9999	0/0068	0/9993	0/0037	0/9998	U40
0/0085	0/9991	0/0055	0/9995	0/0096	0/9981	U28 – D8
0/0022	0/9999	0/0095	0/9987	0/0095	0/9981	U40 – D8
0/0080	0/9993	0/0072	0/9993	0/0156	0/9955	U28 – D15
0/0112	0/9986	0/0059	0/9995	0/0183	0/9938	U40 – D15

ادامه جدول (6)

دما (°C)						مدل (7)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	تیمار
0/0145	0/9967	0/0131	0/9969	0/0093	0/9979	Control
0/0168	0/9961	0/0098	0/9984	0/0036	0/9997	D8
0/0143	0/9974	0/0070	0/9992	0/0020	0/9999	D15
0/0272	0/9909	0/0244	0/9917	0/0180	0/9944	U28
0/0252	0/9922	0/0224	0/9930	0/0140	0/9966	U40
0/0195	0/9952	0/0109	0/9982	0/0036	0/9997	U28 – D8
0/0213	0/9943	0/0155	0/9965	0/0049	0/9995	U40 – D8
0/0195	0/9957	0/0118	0/9981	0/0049	0/9995	U28 – D15
0/0159	0/9971	0/0126	0/9979	0/0107	0/9979	U40 – D15

جدول (7) ضرایب مدل‌های ریاضی پیشنهادی برای پیشگویی میزان محتوی رطوبتی قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، طی فرآیند سرخ کردن عمیق در دماهای معین، بر اساس جدول 5*

RMSE	R ²	مدل (1)	دما (°C)
0/0377	0/9551	$MR = \exp(-0/0031 \times t)$	150
0/0386	0/9642	$MR = \exp(-0/0038 \times t)$	170
0/0399	0/9675	$MR = \exp(-0/0044 \times t)$	190
RMSE	R ²	مدل (2)	دما (°C)
0/0349	0/9624	$MR = 0/9710 \times 0/9970^t$	150
0/0367	0/9684	$MR = 0/9744 \times 0/9963^t$	170
0/0382	0/9709	$MR = 0/9745 \times 0/9958^t$	190
RMSE	R ²	مدل (3)	دما (°C)
0/0236	0/9828	$MR = \frac{1}{(0/0042 \times t) + 1/008} \delta \lambda^t$	150
0/0246	0/9858	$MR = \frac{1}{(0/0054 \times t) + 1/000} t$	170
0/0261	0/9864	$MR = \frac{1}{(0/0065 \times t) + 0/998}$	190
RMSE	R ²	مدل (4)	دما (°C)
0/0235	0/9833	$MR = (7/225E - 06 \times t^2) - (0/0037 \times t) + 0/9933$	150
0/0252	0/9854	$MR = (8/597E - 06 \times t^2) - (0/0043 \times t) + 0/9953$	170
0/0275	0/9852	$MR = (9/626E - 06 \times t^2) - (0/0047 \times t) + 0/9934$	190
RMSE	R ²	مدل (5)	دما (°C)
0/0228	0/9840	$MR = \frac{\exp(-0/0064 \times t)}{1 - (0/0024 \times t)}$	150
0/0242	0/9862	$MR = \frac{\exp(-0/0073 \times t)}{1 - (0/0025 \times t)}$	170
0/0261	0/9865	$MR = \frac{\exp(-0/001 \times t)}{1 + (0/0062 \times t)}$	190
RMSE	R ²	مدل (6)	دما (°C)
0/0215	0/9857	$MR = \frac{1071 + t}{(6/278 \times t) + 1071}$	150
0/0245	0/9859	$MR = \frac{2502 + t}{(15/510 \times t) + 2502}$	170
0/0270	0/9855	$MR = \frac{2502 + t}{(18/240 \times t) + 2502}$	190

E - 0 n = (× 10⁻ⁿ) *

جدول (8) مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها، به صورت تابعی از زمان سرخ‌کردن و دیگر پارامترهای مربوطه

R^2	ضرایب مدل $MR = \exp(-a.t)$
0/9989	$a = 2/33 E-05F_U - 2/89E-05T_D + 8/47E-06T - 2/93E-07F_U^2 + 3/90E-06T_D^2 + 6/60E-08T^2$
R^2	ضرایب مدل $MR = a.b^x$
0/9999	$a = 1/18E-04F_U - 9/76E-04T_D + 0/0115T - 2/81E06 - F_U^2 - 8/78E-06 T_D^2 - 3/36E05 - T^2$
0/9999	$b = 1/64-E-05F_U + 5/93E-05T_D + 0/0118T + 2/01E-07 F_U^2 - 4/86E-06 T_D^2 - 3/48E-05T^2$
R^2	ضرایب مدل $MR = \frac{1}{a.t + b}$
0/9980	$a = 4/26E-05F_U - 5/76E-05T_D - 4/06E-06T - 5/33E-07 F_U^2 + 7/41E-06 T_D^2 + 1/82E-07 T^2$
0/9999	$b = -1/76E-04F_U + 9/08E-04T_D + 0/0120T + 2/48E-06 F_U^2 - 1/60E-05 T_D^2 - 3/61E-05 T^2$
R^2	ضرایب مدل $MR = a.t^c + b.t - c$
0/9986	$a = 3/81E-08F_U + 6/88E-08T_D + 1/67E-08T - 2/06E10 - F_U^2 + 7/61E-09 T_D^2 + 1/26E-10 T^2$
0/9993	$b = -1/90E-05F_U + 8/32E-07T_D - 1/73E-05T + 1/89E-07 F_U^2 - 3/12E-06 T_D^2 - 2/63E-08 T^2$
0/9999	$c = 2/61E-05F_U - 1/01E-04T_D + 0/0118T - 1/79E-07 F_U^2 - 2/05E-05 T_D^2 - 3/46E-05T^2$
R^2	ضرایب مدل $MR = \frac{\exp(-a.t)}{1 - b.t}$
0/9995	$a = 2/41E-05F_U + 2/52E-05T_D + 3/48E-05T - 1/80E-07 F_U^2 + 4/51E-06 T_D^2 + 1/06E-08 T^2$
0/9994	$b = 8/04E-07F_U + 3/06E-05T_D + 2/14E-05T + 5/69E08 - F_U^2 + 1/60E-07 T_D^2 - 4/92E-08 T^2$
R^2	ضرایب مدل $MR = \frac{t+a}{b.t+a}$
0/9833	$a = 3/055F_U - 42/79T_D + 9/745T - 0/0511 F_U^2 + 0/5768 T_D^2 - 0/0161 T^2$
0/9896	$b = 0/0612F_U - 0/2344T_D + 0/0058T - 0/0008 F_U^2 + 0/0078 T_D^2 + 0/0002 T^2$

T، FU، TD به ترتیب نشان‌دهنده بسامد پیش‌تیمار مافوق صوت، زمان پیش‌تیمار خشک کردن و دمای سرخ کردن می‌باشند.

منابع

- [1] Varela, G., Bender, A.E., Morton, I.D. (1998). Frying of foods. *Ellis Horwood Ltd, Chichester*.
- [2] Ziaifar, A.M., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I., Trystram, G. (2008). Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 43, 1410-1423.
- [3] Gamble, M.H., Rice, P., Selman, J.D. (1987b). Relationship between oil uptake and moisture loss during fry-ing of potato slices from c. v. Record U.K. tubers. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 22, 233-241.
- [4] Clark, J.P. (2003). Happy birthday, potato chip! and other snack developments. *Food Technol.*, 57, 89-92.

- [14] Troncoso, E., Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT-Food Sci Technol.*, 42, 1164-1173.
- [15] Moyano, P.C., Berna, A.Z. (2002). Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technol.*, 20, 1303-1318.
- [16] Math, R.G., Velu, V., Nagender, A., Rao, D.G. (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *J. Food Eng.*, 64, 429-434.
- [17] Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C., Moyano, P. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. *Int. J. Food Prop.*, 8, 289-299.
- [18] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. (2000b). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *J. Food Eng.*, 44, 39-46.
- [19] AOAC. (1990). Official methods of analysis. Association of official analytical chemists. 15th ed., Washington, DC.
- [20] Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion, 2nd ed., Oxford: Clarendon Press.
- [21] Dehghan-Nasiri, F., Mohebbi, M., Tabatabaee Yazdi, F., Haddad Khodaparast, M.H. (2011). Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food Bioprod. Process.*, 89, 241-247.
- [22] Steel, R.G.D., Torrie, J.H., Dickey, D.A. (1997). Principles and procedures of statistics: a biometrical approach, 3th ed., New York: McGraw-Hill Companies.
- [23] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. (2000a). Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *J. Food Eng.* 43, 147-154.
- [24] Ziaifar, A.M., Courtois, F., Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *J. Food Process Eng.*, 33, 191-212.
- [25] Sosa-Morales, M.E., Orzuna-Espíritu, R., Vélez-
- [5] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B., Marinou-Kouris, D. (2001). Effect of pre-drying on quality of French fries. *J. Food Eng.*, 49, 347-354.
- [6] Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Benedito, J., Mulet, A. (2012). Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *J. Food Eng.*, 110, 200-207.
- [7] Garcia-Perez, J., Ortuño, C., Puig, A., Carcel, J., Perez-Munuera, I. (2012). Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. *Food Bio-process Tech.*, 5, 2256-2265.
- [8] Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Res. Int.*, 48, 410-427.
- [9] Fernandes, F.A.N., Gallão, M.I., Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *J. Food Eng.*, 90, 186-190.
- [10] Rodrigues, S., Gomes, M.C.F., Gallão, M.I., Fernandes, F.A.N. (2009). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on cell structure of sapotas. *J. Sci. Food Agric.*, 89, 665-670.
- [11] 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. *Iran. J. Nut. Sci. Food Technol.*, 8, 99-111 (in Persian).
- [12] Naghavi, E.A., Dehghannya, J., Ghanbarzadeh, B. (2013). Oil uptake modeling during deep-fat frying of potato strips pretreated with ultrasound and drying. *J. Food Res.*, 23, 393-410 (in Persian).
- [13] Bravo, J., Sanjuan, N., Ruales, J., Mulet, A. (2009). Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. *Drying Technol.*, 27, 782-786.



Ruiz, J.F. (2006). Mass, thermal and quality aspects of deep-fat frying of pork meat. *J. Food Eng.*, 77, 731-738.

[26] Rice, P., Gamble, M.H. (1989). Technical note: Modelling moisture loss during potato slice frying. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 24, 183-187.

[27] Saravacos, G.D., Maroulis, Z. B. (2001). Transport properties of foods., Marcel Dekker, Inc.: New York.

[28] Ngadi, M., Li, Y., Oluka, S. (2007). Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different degrees of hydrogenation. *LWT-Food Sci Technol.*, 40, 1784-1791.

