

مدل‌سازی و بررسی سینتیک خروج آب در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با فراصوت و پوشش خوراکی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق

طاووس رونقی^۱ و جلال دهقان‌نیا^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۲/۵/۱۳

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

^۲ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: Email: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی محتوای رطوبت طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با غلظت ۰/۱ و ۰/۲٪ کربوکسی‌متیل سلولز و فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه بود. قطعات سیب‌زمینی با اندازه‌های ۴×۱/۲×۱/۲ سانتی‌متر مکعب برش داده شدند و بعد از انجام پیش‌تیمارهای مربوطه، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به مدت ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه سرخ شدند. از قانون انتشار فیک برای مدل‌سازی محتوای رطوبت استفاده شد. میانگین ضریب تبیین بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از این مدل، بیش از ۰/۹۷۳ و ضریب انتشار مؤثر رطوبت به دست آمده نیز بین $6/106 \times 10^{-8}$ و $2/896 \times 10^{-8}$ m²/s متغیر بود. پیش‌تیمار فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز باعث افزایش سرعت اتلاف رطوبت و در نتیجه افزایش معنی‌دار ضریب انتشار مؤثر رطوبت شد؛ در حالیکه پوشش خوراکی در هر دو غلظت باعث کاهش ضریب انتشار مؤثر رطوبت گردید ولی تأثیر آن از لحاظ آماری در مقایسه با نمونه شاهد (قطعات مستطیلی به ابعاد ۴×۱/۲×۱/۲ cm³) معنی‌دار نبود. تلفیق این دو پیش‌تیمار نیز باعث افزایش این ضریب نسبت به نمونه شاهد و کاهش آن نسبت به فراصوت تنها شد. در این مطالعه، از تعدادی مدل تجربی پیشنهادی نیز برای مدل‌سازی محتوای رطوبت استفاده گردید. تمامی مدل‌های به‌کار رفته، به‌خوبی داده‌های آزمایشی را برازش کردند. همچنین با استفاده از رابطه آرنیوس تأثیر دما بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت بررسی شد؛ در دماهای بالاتر انرژی فعال‌سازی کمتر بوده و در نتیجه ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: محتوای رطوبت، فراصوت، سرخ‌کردن عمیق، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، مدل‌سازی

Kinetic modeling of water loss in potato slices pretreated with ultrasound and edible coating during deep-fat frying process

T Ronaghi¹ and J Dehghannya²

Received: July 6, 2012 Accepted: July 4, 2013

¹MSc Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding author: Email J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

Abstract

The purpose of this study was to model moisture content during deep-fat frying of potato slices pretreated with 0.1 and 0.2% carboxymethyl cellulose concentration and 40 kHz ultrasound frequency for 15 minutes. The potato slices were cut into $1.2 \times 1.2 \times 4$ cm³ rectangular pieces and after performing the pretreatments, the frying process was done at three different temperatures of 150, 170 and 190°C for 1, 2, 3 and 4 minutes. The Fick's law of diffusion was used to model moisture content during the process. Average correlation coefficient between experimental and model data was more than 0.973 and the effective moisture diffusivity coefficient was in the range between 3.896×10^{-8} and 6.106×10^{-8} m²s⁻¹. Ultrasound pretreatment increased the water loss rate, resulting in a significant increase in the effective moisture diffusivity while the edible coating reduced the effective moisture diffusivity on both the concentrations. However, its effect was not statistically significant compared to the control samples (rectangular slices with dimensions of $4 \times 1.2 \times 1.2$ cm³). Combining these two pretreatments increased the coefficient in comparison to the control samples, but decreased the coefficient compared to the samples pretreated with ultrasound alone. A number of empirical proposed models were used for modeling moisture content. All the models used were well fitted to the experimental data. The influence of temperature on effective moisture diffusivity was investigated using the Arrhenius equation. The activation energy was lower at higher temperatures increasing the effective moisture diffusivity.

Keywords: Deep-fat frying, Effective moisture diffusivity, Modeling, Moisture content, Ultrasound

مقدمه

وقوع می‌پیوندد (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۱). به دلیل وقوع پدیده‌های انتقال حرارت از روغن به داخل ماده غذایی و همچنین انتقال جرم مابین روغن و ماده غذایی، تغییرات فیزیکی و شیمیایی متعددی مانند خروج رطوبت، مهاجرت مواد محلول، ورود روغن به داخل ماده غذایی، تغییر شکل‌های مکانیکی مانند چروکیدگی، انبساط، تغییرات ماتریکس، تشکیل پوسته، رتروگراداسیون و انتقال شیشه‌ای کربوهیدرات‌ها (یامسانق‌سونق ۲۰۰۲).

سرخ کردن عمیق، به عنوان یک فرآیند پخت که در آن کاهش رطوبت رخ می‌دهد، تعریف می‌شود (ویتراک و همکاران ۲۰۰۲؛ براوو و همکاران ۲۰۰۹). با کاهش محتوای رطوبت محصول به دلیل دمای بالای فرآیند، علاوه بر کاراملیزاسیون، واکنش‌های شیمیایی متعددی مانند ژلاتینیزاسیون نشاسته، دناتوراسیون پروتئین و ... به وقوع می‌پیوندد (مویانو و پدرسچی ۲۰۰۶). در این فرآیند، انتقال رطوبت از ماده غذایی به روغن از یکسو و جذب روغن به داخل ماده غذایی از سوی دیگر به

خوبی در مقابل چربی هستند (دونهو و همکاران ۱۹۹۳؛ باجاج و سینگال ۲۰۰۷). رومسی و کروکتا (۱۹۹۴) انواع مختلفی از فیلم‌ها و موارد استفاده آنها را در فرآیند سرخ‌کردن، مورد مطالعه قرار دادند و برای ماده غذایی پوشش داده شده با فیلم خوراکی، انتقال رطوبت را با استفاده از قانون انتشار فیک مدل‌سازی کردند. در پژوهش دیگری، مدل‌سازی انتقال جرم برای مواد غذایی پوشش داده شده در حین فرآیند سرخ‌کردن انجام شد (مالیکارجونان و همکاران ۱۹۹۵). ویلیامز و میتال (۱۹۹۹) نیز انتقال رطوبت را برای ماده غذایی پوشش داده شده با فیلم خوراکی، مدل‌سازی کردند. در این پژوهش، نمونه‌های پوشش داده شده با صمغ ژلان، مقدار رطوبت نهایی بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند. ضریب انتشار مؤثر رطوبت گزارش شده برای ماده غذایی نیز در این پژوهش، $0.73 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ بود که در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر، اختلاف آن به تفاوت در نوع ماده غذایی و نوع پوشش مورد استفاده نسبت داده شد.

به دلیل ارتباط مستقیم بین میزان خروج رطوبت و جذب روغن در حین سرخ‌کردن، بررسی تأثیر پوشش‌های خوراکی بر کاهش جذب روغن نیز حائز اهمیت است. در پژوهشی، اثر پوشش‌دهی با مواد هیدروکلوئیدی بر میزان جذب روغن و خواص کیفی خلال‌های سیب‌زمینی بررسی شد (دارائی گرمه‌خانی و همکاران ۱۳۸۷؛ دارائی گرمه‌خانی و همکاران ۱۳۸۸). نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که پوشش‌دهی با مواد هیدروکلوئیدی به علت خاصیت سد کنندگی، منجر به کاهش اتلاف رطوبت خلال‌ها در هنگام سرخ‌کردن شده و با توجه به نقش کنترل‌کنندگی آب در میزان جذب روغن، مقدار روغن در همه نمونه‌های پوشش‌دهی شده در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. به عنوان مثال، از بین صمغ‌های مورد مطالعه، مخلوط کربوکسی متیل سلولز و پکتین با غلظت ۱ درصد و زانتان با غلظت ۱/۵ درصد کمترین میزان چربی را دارا بودند. در پژوهش دیگری، اثر

به‌منظور کنترل کیفیت نهایی محصولات سرخ‌شده، فهم فرآیند پیچیده‌ای که در طول فرآوری این محصولات اتفاق می‌افتد، ضروری می‌باشد. به دلیل کاهش قابل ملاحظه رطوبت ماده غذایی در حین فرآیند سرخ‌کردن، پیش‌بینی سینتیک خروج رطوبت با استفاده از توسعه یک مدل برای طراحی و کنترل فرآیند سرخ‌کردن مهم است (کستا و همکاران ۱۹۹۹؛ براوو و همکاران ۲۰۰۹). مدل‌سازی محتوای رطوبت، روابط بین متغیرهای رطوبت و زمان را نشان می‌دهد که در آن پارامتری به-نام ضریب انتشار مؤثر رطوبت، میزان انتقال جرم را بر حسب واحد سطح بر واحد زمان نشان می‌دهد. با تخمین ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می‌توان بعد از اعتبارسنجی و تأیید مدل، میزان خروج رطوبت را پیش-بینی و فرآیند را کنترل کرد (براوو و همکاران ۲۰۰۹). براوو و همکاران (۲۰۰۹) از قانون انتشار فیک برای مدل‌سازی انتقال جرم در حین سرخ‌شدن ورقه‌های سیب در چهار دمای ۱۶۰، ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۷۰ درجه سانتیگراد استفاده کردند. در این پژوهش، برای بررسی تأثیر دما بر ضریب انتشار مؤثر، رابطه آرنیوس^۱ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که خروج رطوبت طی سرخ‌کردن ورقه‌های سیب، بخوبی با قانون دوم فیک قابل توصیف است. همچنین با افزایش دما، میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت و در نتیجه میزان خروج رطوبت افزایش می‌یابد.

از پیش‌تیمارهایی مانند آنزیم‌بری (موریرا و همکاران ۱۹۹۹)، خشک کردن (لامبرگ و همکاران ۱۹۹۰)، انجماد (کوک و همکاران ۱۹۹۵) و پوشش دادن^۲ قبل از سرخ-کردن (ملما ۲۰۰۳) برای افزایش کیفیت مواد غذایی در حین فرآیند سرخ‌کردن استفاده شده است. هرکدام از این پیش‌تیمارها دارای مزایا و معایبی می‌باشند. پوشش‌های پلی‌ساکاریدی، که کربوکسی‌متیل سلولز نیز از این گروه می‌باشد، شدیداً هیدروفیلیک بوده و محافظ

³ Arrhenius

⁴ Coating

سرخ‌کردن و بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصول نهایی گردد.

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی محتوای رطوبت و بررسی ضریب انتشار مؤثر رطوبت، طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با فراصوت و پوشش خوراکی به‌منظور کنترل بهینه فرآیند بود.

مواد و روش‌ها

مواد

مواد خام مورد استفاده در این پژوهش سیب‌زمینی و روغن مایع بود. سیب‌زمینی (رقم آگریا) از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایشات در سردخانه بالای صفر (12°C) نگهداری شد و روغن مورد استفاده در این مطالعه، روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه) با نام تجاری بهار بود. برای پوشش دادن نمونه‌ها از کربوکسی‌متیل سلولز (سانروس ساخت ژاپن) استفاده شد.

تجهیزات

سرخ‌کن مورد استفاده در این پژوهش، سرخ‌کن خانگی (Mulinex، مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰، دارای یک محفظه ضد زنگ، سبد جداشونده)، آون کنوکسیونی (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) جهت اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌ها و حمام فراصوت (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، شرکت TAKASHI مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان فرآیند) برای اولتراسونیکاسیون استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از شستشو و پوست‌گیری سیب‌زمینی، برای تهیه نمونه‌ها با ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 4$ سانتی‌متر، از یک کاتر دستی طراحی شده با همین ابعاد استفاده شد. سپس

کاراگینان (در غلظت یک درصد) و نیز اثر دمای روغن و زمان سرخ‌کردن بر درصد جذب روغن محصولات سرخ‌شده سیب‌زمینی مورد بررسی قرار گرفته است (علی‌پور و همکاران ۱۳۸۸). نتایج این پژوهش نیز نشان داد که کاراگینان بعنوان یک پوشش هیدروکلوئیدی باعث کاهش جذب روغن در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌شود.

از پیش‌تیمار دیگری که در طی سالیان اخیر حین فرآیندهای انتقال جرم مورد استفاده قرار گرفته است، میتوان به فراصوت^۳ با شدت بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز اشاره نمود. به عنوان مثال، از فراصوت برای پیش‌تیمار میوه‌ها قبل از فرآیند خشک کردن جهت کاهش زمان فرآیند و افزایش کیفیت محصول مورد فرآوری بطور گسترده استفاده شده است (فرناندز و رودریگو ۲۰۰۸). امواج فراصوت، با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی‌درپی در ماده غذایی باعث تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و سهولت خروج رطوبت از داخل محصول می‌شود (فرناندز و همکاران ۲۰۰۹). فراصوت، بدون افزایش دما و داشتن اثرات سوء روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی می‌تواند به عنوان یک پیش‌تیمار در خشک‌کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود؛ چون باعث افزایش سرعت و کاهش دمای مورد نیاز برای خشک‌کردن می‌شود (سان ۲۰۰۵). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که اولتراسونیکاسیون با افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و افزایش سرعت انتشار مولکولهای آب در حین خشک‌شدن، باعث کاهش چروکیدگی و بهبود خصوصیات رنگی و حسی محصول خشک شده می‌شود (فرناندز و همکاران ۲۰۰۹). بر اساس اطلاعات موجود، تا بحال روی فراصوت بعنوان پیش‌تیمار فرآیند سرخ‌کردن و تأثیر آن بر نمونه‌ها و شرایط فرآیند مطالعه ای صورت نگرفته است. در این مطالعه، فرض بر این بود که پیش‌تیمار فراصوت، به دلیل افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می‌تواند باعث کاهش زمان

⁵ Ultrasound

انجام شد. برای سرخ‌کردن از سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C استفاده شد. روغن مورد استفاده پس از هر هشت بار فرآیند سرخ‌کردن، تعویض شد. تمامی آزمایشات حداقل با دو تکرار انجام شد و داده‌های گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

آزمایشات

محتوای رطوبت

محتوای رطوبت، با خشک‌کردن نمونه‌ها در آون همرفتی با دمای 105 ± 1 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری (AOAC ۱۹۸۴) و بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

محتوای روغن

محتوای روغن نمونه‌های سرخ‌شده با استخراج روغن آنها توسط حلال پترولیوم اتر در دستگاه سوکسله اندازه‌گیری گردید (AOAC ۱۹۹۵) و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

چروکیدگی

برای اندازه‌گیری چروکیدگی، حجم نمونه خام و سرخ‌شده توسط پیکنومتر پر شده با حلال تولوئن اندازه‌گیری شد و سپس از نسبت اختلاف حجم نمونه خام و نمونه سرخ‌شده به حجم نمونه خام، میزان چروکیدگی به‌صورت عدد بدون بعد محاسبه شد (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۱۰).

دانسیتته ظاهری

بعد از اندازه‌گیری حجم ظاهری نمونه سرخ‌شده توسط پیکنومتر پر شده با حلال تولوئن، از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ‌شده مقادیر دانسیته ظاهری به‌صورت گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۱۰).

مدل‌سازی ریاضی

مدل‌سازی محتوای رطوبت بر اساس قانون فیک

از قانون انتشار فیک (مدل ۱) برای مدل‌سازی محتوای رطوبت استفاده شد (کرنک ۱۹۷۵):

نمونه‌های مکعب مستطیلی شکل، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند و رطوبت اضافی با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. در مرحله بعد نمونه‌ها به‌صورت زیر تهیه شدند (جدول ۱):

نمونه‌های شاهد (۱): نمونه‌هایی که بلافاصله در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

کربوکسی‌متیل سلولز ۰/۱٪ و کربوکسی‌متیل سلولز ۰/۲٪ (۲ و ۳): نمونه‌هایی که به منظور پوشش دادن، در محلول‌های ۰/۱ و ۰/۲٪ تهیه شده از کربوکسی‌متیل سلولز، به مدت ۱۰ ثانیه به‌طور مجزا غوطه‌ور شدند.

فراصوت (۴): نمونه‌هایی که جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در حمام فراصوت در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند.

فراصوت- کربوکسی‌متیل سلولز ۰/۱٪ و فراصوت- کربوکسی‌متیل سلولز ۰/۲٪ (۵ و ۶): نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار تلفیقی از فراصوت و پوشش خوراکی، ابتدا در حمام فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و سپس به‌طور مجزا در محلول‌های ۰/۱ و ۰/۲٪ از پوشش خوراکی به مدت ۵ ثانیه به‌طور مجزا غوطه‌ور شدند.

شرایط سرخ‌کردن

جهت سرخ‌کردن نمونه‌های تهیه شده بر اساس جدول ۱، ابتدا سرخ‌کن تا خط نشانه پر از روغن شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن موردنظر، سرخ‌کن بر روی حالت خودکار قرار داده شد؛ سپس حدود ۴۰-۵۰ گرم نمونه (۷-۸ قطعه) داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شد و با رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای موردنظر، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور خودکار داخل روغن غوطه‌ور گردید؛ به‌طوری‌که روی قطعات با روغن پوشانده شد. پس از سرخ‌شدن به مدت زمان موردنظر، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور خودکار از سرخ‌کن بیرون آمده و با آژیر سرخ‌کن، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شدند و سپس روغن اضافی آنها توسط یک دستمال کاغذی گرفته شد و بلافاصله آزمایش‌های مربوطه بر روی آنها

D_0 : پیش فاکتور نمایی

E_a : انرژی فعال‌سازی (J/mol)

R : ثابت جهانی گازها (J/mol K ۸/۳۰۹)

T : دما (K)

لگاریتم D_{eff} به صورت تابعی از عکس دمای مطلق، یک رابطه خطی را نشان می‌دهد که از حاصلضرب شیب این خط در ثابت جهانی گازها، انرژی فعال‌سازی به دست می‌آید.

تحلیل آماری

در این مطالعه، ۶ تیمار نشان داده شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C و ۴ و ۳ و ۲ و ۱ زمان ۴ دقیقه سرخ شدند و کلیه آزمایشات در دو تکرار (۱۴۴=۲×۴×۳×۶) 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 بونفرونی^۶ (استیل و همکاران ۱۹۹۷) در سطح احتمال ۹۵٪ ($P < 0.05$) استفاده شد.

نتایج و بحث

روند تغییرات محتوای رطوبت

شکل ۱- الف، محتوای رطوبت نمونه‌های شاهد سرخ-شده را بر حسب تابعی از زمان در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل پیداست، با پیشرفت زمان، محتوای رطوبت در تمامی دماها کاهش یافته است. در این شکل، کاهش رطوبت به صورت تابعی از زمان، رفتار نمایی از خود نشان می‌دهد ولی در مراحل انتهایی آهنگ خروج رطوبت، کاهش یافته و به سمت حالت تعادلی پیش می‌رود. در بررسی تأثیر دما بر محتوای رطوبت نمونه‌ها، در منحنی محتوای رطوبت به صورت تابعی از زمان (شکل ۱- الف)، افزایش دما از ۱۵۰ به ۱۹۰°C، کاهش بیشتر محتوای رطوبت نمونه‌ها را در زمان یکسان در پی

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

M_t : مقدار رطوبت بدون بعد

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

m_0 : رطوبت اولیه سیب‌زمینی (g water/g dry basis, oil free)

m_e : رطوبت تعادلی (g water/g dry basis, oil free)

t : زمان (s)

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

L : نصف ضخامت صفحه (m)

ضریب انتشار مؤثر رطوبت، از شیب رگرسیون خطی نقاط حاصل از رسم نمودار محتوای رطوبت بدون بعد به صورت تابعی از زمان قابل محاسبه است.

مدل‌سازی محتوای رطوبت بر اساس مدل‌های تجربی پیشنهادی

در این پژوهش، مدل‌سازی محتوای رطوبت در قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، به صورت تابعی از زمان، جذب روغن، چروکیدگی و دانسیته ظاهری صورت گرفت. مدل‌های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار MATLAB (Version 7.12.635, R) به دست آمد. ارزیابی مدل‌ها نیز با استفاده از دو معیار ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا انجام شد. مدل‌هایی که دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین تری بودند به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

تأثیر دما بر D_{eff}

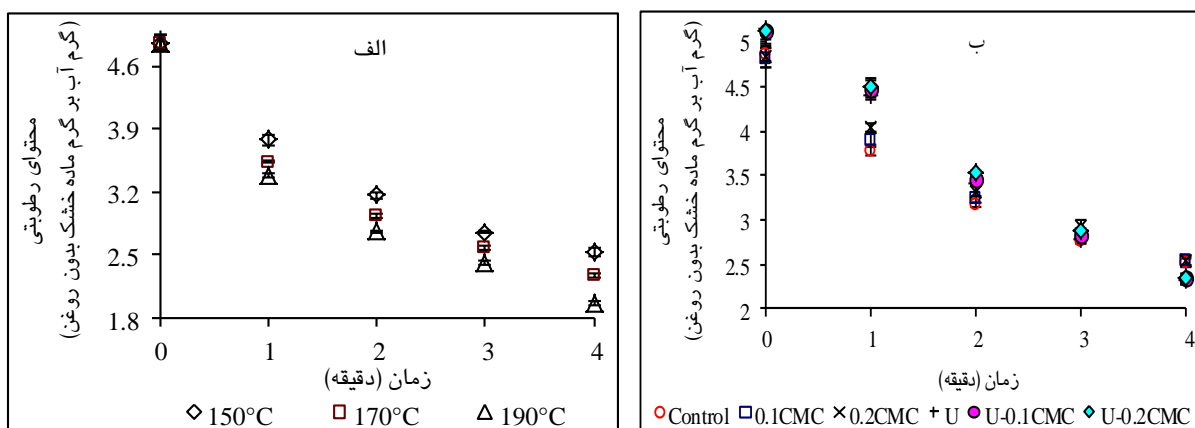
برای محاسبه انرژی فعال‌سازی از رابطه آرنیوس (معادله ۲) استفاده شد. این رابطه تأثیر دما را بر روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت نشان می‌دهد (تورونکوسو و پدرسچی ۲۰۰۹):

$$D_{eff} = D_0 \exp(-E_a/RT) \quad (2)$$

⁶ Bonferroni

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	۱
0.1CMC	پوشش دادن با محلول ۰/۱٪ کربوکسی متیل سلولز	۲
0.2CMC	پوشش دادن با محلول ۰/۲٪ کربوکسی متیل سلولز	۳
U	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه	۴
U-0.1CMC	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه-پوشش دادن با محلول ۰/۱٪ کربوکسی متیل سلولز	۵
U-0.2CMC	سلولز	۶



شکل ۱- محتوای رطوبتی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده به صورت تابعی از زمان: الف) در سه دمای مختلف برای نمونه شاهد، ب) برای پیش‌تیمارهای مختلف در دمای ۱۵۰°C

کاهش در محتوای رطوبت را از خود نشان دادند. در ارتباط با بیشتر بودن محتوای رطوبت نمونه‌های پیش-تیمارشده با پوشش خوراکی نسبت به نمونه شاهد، می‌توان بدین صورت استدلال نمود که بیوپلیمرهای هیدروفیلیک می‌توانند بعنوان متصل‌کننده‌های آب عمل کرده و با باند شدن به رطوبت، باعث کاهش خروج رطوبت شوند (ملما ۲۰۰۳). همچنین بعضی پوشش‌های خوراکی مانند مشتقات سلولز، در اثر حالت ترموزلی یا ایجاد پیوندهای عرضی، قدرت پوشش‌دهی بالایی داشته و در اثر بخار، کمتر آسیب دیده و در نتیجه انتشار رطوبت را کاهش می‌دهند (پینتوس و همکاران ۱۹۹۲). آناپور و همکاران (۱۹۹۹) نیز کاهش خروج رطوبت را در استفاده از کربوکسی‌متیل‌سلولز و هیدروکسی-پروپیل‌متیل‌سلولز به‌عنوان پوشش خوراکی در فرآیند سرخ‌کردن، به تشکیل فیلم روی ماده غذایی نسبت دادند. این محققان اضافه کردند که لایه‌های خیلی نازک

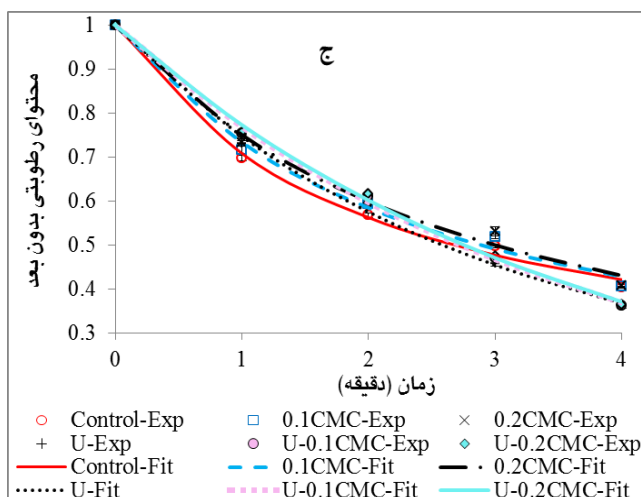
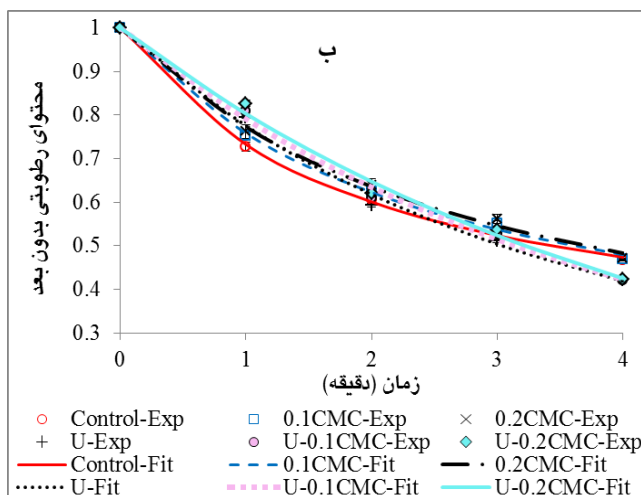
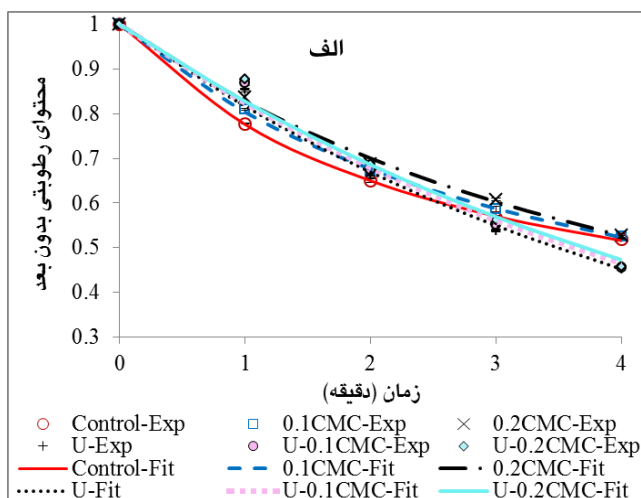
داشت؛ به دلیل اینکه با افزایش دما تبخیر رطوبت سریعتر صورت گرفته و در زمان کمتری به رطوبت تعادلی می‌رسد (کروکید و همکاران ۲۰۰۰؛ ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸). با این حال، دما تأثیر معنی‌داری از لحاظ آماری روی خروج رطوبت نداشت. این یافته در تطابق با نتایج به‌دست آمده توسط بودزاک و سروگا (۲۰۰۵) و براوو و همکاران (۲۰۰۹) می‌باشد. شکل ۱- ب نیز، منحنی تغییرات محتوای رطوبت را در ۴ زمان ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه، در تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱، بعد از سرخ‌کردن در دمای ۱۵۰°C نشان می‌دهد. روند تغییرات دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰°C نیز مشابه دمای ۱۵۰°C بود. با توجه به شکل ۱- ب، با پیشرفت زمان، محتوای رطوبت تمامی تیمارها کاهش پیدا کرد. محتوای رطوبت نمونه‌های شاهد در دو دقیقه اول کاهش بیشتری داشتند و بعد از آن به ترتیب نمونه‌های پوشش داده شده با پوشش خوراکی ۰/۱ و ۰/۲٪ بیشترین

مدل‌سازی محتوای رطوبت

شکل ۲، مدل‌سازی محتوای رطوبت بدون بعد را در ۴ زمان ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه، در تیمارهای مختلف در ۳ دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C نشان می‌دهد. این منحنی‌ها، سرعت نزولی دهیدراسیون^۷ را در فرآیند سرخ‌کردن نشان می‌دهند که با منحنی‌های گزارش‌شده در فرآیند سرخ‌کردن محصولات دیگر مطابقت دارد (سahین و همکاران ۱۹۹۹؛ کروکی‌دا و همکاران ۲۰۰۰؛ ویتراک و همکاران ۲۰۰۲؛ پدرسچی و همکاران ۲۰۰۵). منحنی‌ها در ابتدا شیب تندتری داشته و رفته رفته با نزدیک شدن به رطوبت تعادلی از شیب آنها کاسته می‌شود. همچنین، با مقایسه سه منحنی الف، ب و ج می‌توان دریافت که دما باعث کاهش محتوای رطوبت بدون بعد می‌شود. به عنوان مثال، بعد از یک دقیقه فرآیند سرخ‌کردن، محتوای رطوبت بدون بعد برای نمونه شاهد، در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به ترتیب ۰/۷۷۷، ۰/۷۲۷ و ۰/۶۹۸ می‌باشد. جدول ۲، مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل از قانون انتشار فیک را در سه دمای مختلف برای پیش‌تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش دما، ضریب انتشار مؤثر رطوبت در تمامی پیش‌تیمارها افزایش می‌یابد و بیشترین D_{eff} مربوط به دمای ۱۹۰°C می‌باشد. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش‌های بودزاک و سروگا (۲۰۰۵)، براوو و همکاران (۲۰۰۹) و تورونکوسو و پدرسچی (۲۰۰۹) همخوانی دارد. تأثیر دما بر افزایش D_{eff} را می‌توان به تبخیر و خروج سریع‌تر رطوبت در دماهای بالا و کاهش بیشتر محتوای رطوبت در بازه زمانی ثابت نسبت داد. در بررسی تأثیر پیش‌تیمارها بر روی D_{eff} ، با توجه به جدول ۲، ملاحظه می‌شود که مقادیر D_{eff} نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت، در تمامی دماها بیشتر از دیگر پیش‌تیمارها می‌باشد. بعد از آن نیز نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت-کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۱٪، فراصوت-کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۱٪، فراصوت-کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۲٪ و فراصوت-کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۳٪ نشان دادند.

و خیلی ضخیم فیلم (به دلیل عدم انعطاف‌پذیری و گسیختگی در مقابل فشار بخار)، باعث افزایش خروج رطوبت می‌شوند. این نتایج در تطابق با نتایج حاصل از پژوهش‌های گارسا و همکاران (۲۰۰۲) در مورد محتوای رطوبت، در استفاده از متیل سلولز به عنوان پوشش در سیب‌زمینی سرخ‌شده می‌باشد که در آن میزان حفظ رطوبت نسبت به نمونه شاهد، ۶/۳٪ بیشتر بود. همچنین، تحقیقات مالیکارجونان و همکاران (۱۹۹۷)، ویلیامز و میتال (۱۹۹۷)، ویلیامز و میتال (۱۹۹۹)، آلبرت و میتال (۲۰۰۲) و ضیایی‌فر و همکاران (۲۰۰۸) افزایش محتوای رطوبت ماده غذایی را در استفاده از مشتقات سلولز به عنوان پیش‌تیمار در فرآیند سرخ‌کردن را تأیید می‌کنند. بیشترین محتوای رطوبت در دو دقیقه اول نیز، مربوط به نمونه پیش‌تیمار شده با فراصوت-پوشش خوراکی ۰/۲٪ بود که این امر احتمالاً به دلیل محتوای رطوبت اولیه بالاتر نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت (فرناندز و رودریگو ۲۰۰۸) و تأثیر کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۲٪ در حفظ رطوبت داخل قطعات سیب‌زمینی بود. قابل ذکر است که در دو دقیقه اول، بیشتر بودن محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمار-شده با کربوکسی‌متیل‌سلولز، در هیچ یک از غلظت‌های آن نسبت به نمونه شاهد و نسبت به هم‌دیگر از لحاظ آماری معنی‌دار نبود، ولی افزایش محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت تنها و فراصوت-کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۱ و ۰/۲٪ معنی‌دار بود. بعد از دقیقه دوم، بین محتوای رطوبت پیش‌تیمارهای مورد آزمون، تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری وجود ندارد؛ با این حال نمونه پیش‌تیمار شده با فراصوت، کمترین محتوای رطوبت را در دقیقه چهارم داشت و بعد از آن نیز به ترتیب نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت-پوشش خوراکی ۰/۱٪، فراصوت-پوشش خوراکی ۰/۲٪، شاهد، پوشش خوراکی ۰/۱٪ و پوشش خوراکی ۰/۲٪ کمترین محتوای رطوبت را نشان دادند.

⁷ Falling rate period



شکل ۲- تغییرات محتوای رطوبتی بدون بعد (M_t) حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل پیشنهادی ۴ (جدول ۳) در حین سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای $150^{\circ}C$ (الف)، $170^{\circ}C$ (ب) و $190^{\circ}C$ (ج) در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

سلولز ۰/۲٪ و شاهد، به ترتیب بیشترین مقادیر D_{eff} را دارند. نمونه‌های پیش‌تیمارشده با کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۱٪ و کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۲٪ نیز کمترین مقادیر D_{eff} را به خود اختصاص دادند.

افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت در نمونه‌های دارای پیش‌تیمار فراصوت را می‌توان به تغییرات ساختاری و کانال‌های ریز میکروسکوپی ایجاد شده در اثر انقباض و انبساط‌های متوالی امواج در ماده غذایی نسبت داد که با ایجاد حالت اسفنجی، خروج راحت‌تر رطوبت را ممکن می‌سازند (فرناندز و رودریگو ۲۰۰۸). قابل ذکر است که افزایش D_{eff} در نمونه‌های دارای پیش‌تیمار فراصوت نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود ولی کاهش این متغیر در نمونه‌های دارای کربوکسی‌متیل‌سلولز در مقایسه با نمونه شاهد معنی‌دار نبود. ضریب انتشار مؤثر رطوبت به دست آمده در این پژوهش بین $3/896 \times 10^{-8}$ (مربوط به پیش‌تیمار ۰/۲٪ کربوکسی‌متیل‌سلولز در دمای $150^{\circ}C$) و $6/106 \times 10^{-8} m^2/s$ (مربوط به فراصوت در دمای $190^{\circ}C$) می‌باشد. محدوده ضریب انتشار مؤثر گزارش شده توسط ساراواکوس و مارولیس (۲۰۰۱) برای انتشار رطوبت در بافت سیب‌زمینی سرخ‌شده، بین $1/25 \times 10^{-8} m^2/s$ و $8 \times 10^{-12} m^2/s$ می‌باشد. مویانو و برنا (۲۰۰۲) نیز مقدار D_{eff} را برای قطعات سیب‌زمینی $7 \times 7 \times 70 mm$ سرخ‌شده در $170^{\circ}C$ و $180^{\circ}C$ بین $4/14 \times 10^{-9} m^2/s$ و $9/4 \times 10^{-9} m^2/s$ گزارش کردند که کمترین مقدار آن مربوط به نمونه شاهد و بیشترین مقدار آن مربوط به نمونه پیش‌تیمارشده با محلول ساکارز ۲۰٪-نمک ۵٪ بود.

جدول ۲- مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت و R^2 برای پیش‌تیمارهای مدل‌سازی شده با قانون فیک مطابق جدول ۱

تیمار	دما (°C)					
	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
	$D_{eff} (m^2/s) \times 10^{-8}$	R^2	$D_{eff} (m^2/s) \times 10^{-8}$	R^2	$D_{eff} (m^2/s) \times 10^{-8}$	R^2
Control	$۳/۹۶۱^h \pm ۰/۰۱۰$	۰/۹۹۶	$۴/۴۶۵^g \pm ۰$	۰/۹۹۹	$۵/۲۲۴^{bcu} \pm ۰/۰۲۰۶$	۰/۹۹۸
0.1CMC	$۳/۹۱۰^h \pm ۰/۰۴۱$	۰/۹۸۹	$۴/۴۲۷^g \pm ۰/۰۱۲$	۰/۹۹۸	$۵/۱۷۲^{cd} \pm ۰/۰۳۱۰$	۰/۹۹۶
0.2CMC	$۳/۸۹۶^h \pm ۰/۰۲۱$	۰/۹۷۴	$۴/۳۹۹^g \pm ۰/۰۱۰$	۰/۹۹۶	$۵/۱۵۱^d \pm ۰/۰۲۰۶$	۰/۹۹۳
U	$۴/۹۹۰^e \pm ۰$	۰/۹۴۲	$۵/۲۶۷^b \pm ۰/۰۲۱$	۰/۹۷۶	$۶/۱۰۶^a \pm ۰/۰۱۰۳$	۰/۹۹۰
U-0.1CMC	$۴/۹۲۷^{ef} \pm ۰/۰۳۵$	۰/۹۴۹	$۵/۲۴۵^{bc} \pm ۰/۰۱۰$	۰/۹۶۹	$۶/۰۷۰^a \pm ۰/۰۲۰۶$	۰/۹۸۱
U-0.2CMC	$۴/۸۹۶^f \pm ۰/۰۱۱$	۰/۹۴۱	$۵/۲۳۱^{bcd} \pm ۰/۰۳۱$	۰/۹۵۸	$۶/۰۴۱^a \pm ۰$	۰/۹۷۸

انتقال جرم (خروج رطوبت) خواهد داشت ولی در زمان-های طولانی فرآیند، در مقابل انتقال رطوبت به صورت یک مانع عمل می‌کند. عامل دیگری که می‌توان به تأثیر آن روی D_{eff} اشاره کرد این است که در مرحله اول سرخ‌کردن که رطوبت کافی در مرکز ماده غذایی وجود دارد، عمل تبخیر رطوبت در حول و حوش نقطه جوش آب صورت گرفته و خروج رطوبت به صورت بخار به راحتی انجام می‌شود؛ با رسیدن محتوای رطوبت به $۰/۲ - ۰/۳$ کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک، مرحله دوم شروع می‌شود که با افزایش دمای مرکزی نمونه از نقطه جوش آب به دمای روغن قابل تشخیص است و سرعت آگیری در این مرحله کاهش می‌یابد (ویتراک و همکاران ۲۰۰۲). احتمالاً تغییرات ساختاری ایجاد شده در اثر دمای بالا در مرحله دوم نیز باعث کاهش D_{eff} می‌شود. ولی با توجه به شکل ۱- الف می‌توان دریافت که در بازه زمانی این پژوهش (۴-۱ دقیقه) هنوز رطوبت به‌طور کامل به تعادل نرسیده است و خروج رطوبت کماکان ادامه دارد.

جدول ۳، چند مدل پیشنهادی برای مدل‌سازی محتوای رطوبت نشان می‌دهد که در این مدل‌ها، محتوای رطوبت به‌صورت تابعی از زمان مدل‌سازی شده است.

در پژوهشی دیگر، پدرسچی و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که D_{eff} طی سرخ‌کردن چیپس سیب‌زمینی پیش-تیمار شده در دمای ۱۲۰، ۱۵۰ و $۱۸۰^{\circ}C$ بین $۳/۵۵ \times ۱۰^{-۹}$ و $۳/۴۸ \times ۱۰^{-۸} m^2/s$ متغیر است. همچنین تورونکوسو و پدرسچی (۲۰۰۹) مقدار D_{eff} را حین سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی شاهد، آنزیم‌بری شده و آنزیم‌بری - خشک- شده با قطر ۳۰ و ضخامت ۳ mm در دمای $۱۸۰^{\circ}C$ به ترتیب، $۱/۷۳ \times ۱۰^{-۸}$ ، $۲/۰۶ \times ۱۰^{-۸}$ و $۲/۹۵ \times ۱۰^{-۸} m^2/s$ گزارش کردند. عوامل متعددی مانند ضخامت پوسته، محتوای رطوبت و استفاده از پیش‌تیمارها بر روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت تأثیر می‌گذارند. یکی از دلایل افزایش D_{eff} در این پژوهش در مقایسه با پژوهش‌های ذکر شده، استفاده از پیش‌تیمار فراصوت است. در استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، به نظر می‌رسد به دلیل کاهش اتصال سلول‌ها، افزایش فضای بین سلولی و گسیختگی نسبی دیواره‌های سلولی (رودریگوز و همکاران ۲۰۰۹) خروج رطوبت راحت‌تر صورت گرفته و باعث افزایش بیشتر D_{eff} طی فرآیند سرخ‌کردن شود. یکی دیگر از دلایل افزایش نسبی D_{eff} در این پژوهش، به علت کم بودن زمان فرآیند (۴ دقیقه) نسبت به منابع اشاره شده می‌باشد. با افزایش زمان فرآیند، به دلیل کاهش محتوای رطوبت نمونه‌ها، D_{eff} کاهش پیدا می‌کند. همچنین، پوسته خارجی تشکیل شده در اطراف ماده غذایی به دلیل دهیدراسیون شدید طی سرخ‌کردن (موریرا و همکاران ۱۹۹۹)، در زمان‌های کوتاه فرآیند، ضخامت کمتری دارد و تأثیر جزئی روی

به شکل ۳- ج نیز ملاحظه می‌شود که با افزایش خروج رطوبت، میزان چروکیدگی افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که در طول آگیری از مواد غذایی دارای رطوبت بالا، ماتریکس الاستیکی در فضاهایی که قبلاً با رطوبت اشغال شده بودند منقبض می‌شود (آگوئیلرا و همکاران ۲۰۰۵). از شکل ۳- د نیز پیداست که با کاهش محتوای رطوبت طی سرخ‌کردن، دانسیته ظاهری کاهش پیدا می‌کند. کاهش دانسیته ظاهری طی سرخ‌کردن به تشکیل حفره‌ها، کاهش محتوای رطوبت و جذب روغن نسبت داده می‌شود (ضیایی فر و همکاران ۲۰۱۰).

تأثیر دما روی D_{eff}

شکل ۴، منحنی تغییرات لگاریتم ضریب انتشار مؤثر رطوبت را به صورت تابعی از عکس دما، بر طبق رابطه آرنیوس، برای تیمارهای مختلف مطابق جدول ۱ نشان می‌دهد. جدول ۵ مقادیر انرژی فعال‌سازی حاصل از شکل ۴ را برای همه پیش‌تیمارها مشخص می‌کند. مطابق این جدول، نمونه پیش‌تیمارشده با فراصوت، کمترین انرژی فعال‌سازی ($8/153 \text{ kJ/mol}$) را به خود اختصاص داده است و این کاهش از لحاظ آماری نسبت به نمونه شاهد، معنی‌دار است. بیشترین انرژی فعال‌سازی هم مربوط به پیش‌تیمار کربوکسی‌متیل سلولز $0/2\%$ ($11/355 \text{ kJ/mol}$) بود ولی افزایش آن از لحاظ آماری در مقایسه با نمونه شاهد معنی‌دار نبود. با توجه به منحنی انرژی فعال‌سازی، دماهای بالا باعث افزایش D_{eff} شده‌اند و مدل آرنیوس به خوبی قادر به برازش مقادیر D_{eff} می‌باشد. موادی که محتوای رطوبت پایینی دارند و یا موادی که خروج رطوبت از آنها به سختی صورت می‌گیرد، نیازمند انرژی فعال‌سازی زیادی هستند (سارواکوس و مارولیس ۲۰۰۱). احتمالاً پیش‌تیمار فراصوت با ایجاد تغییرات ساختاری در ماده غذایی باعث خروج راحت‌تر رطوبت شده و انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد. کربوکسی‌متیل سلولز نیز با کند کردن خروج مولکول‌های آب از ماده غذایی، باعث افزایش انرژی فعال‌سازی شده است. انرژی فعال‌سازی

جدول ۳- مدل‌سازی محتوای رطوبت به صورت تابعی از زمان

ردیف	مدل	مرجع
۱	$M_t = \exp(-k_x t)$	کروکیدا و همکاران (۲۰۰۰)
۲	$M_t = ax + \exp(bt^2)$	تحقیق حاضر
۳	$M_t = a + \exp(bt)$	تحقیق حاضر
۴	$M_t = \exp(at/(b+t))$	تحقیق حاضر
۵	$M_t = \exp(at)/(\exp(b+t))$	تحقیق حاضر
۶	$M_t = -(a+t)/(b+t)$	تحقیق حاضر
۷	$M_t = (1+at)/(1+bt)$	تحقیق حاضر

سه مدل ۸، ۹ و ۱۰ نیز به منظور مدل‌سازی محتوای رطوبت به صورت تابعی از جذب روغن (Y)، چروکیدگی (S) و دانسیته ظاهری (ρ) پیشنهاد شد:

$$M_t = a \exp(bY^c) \quad (8)$$

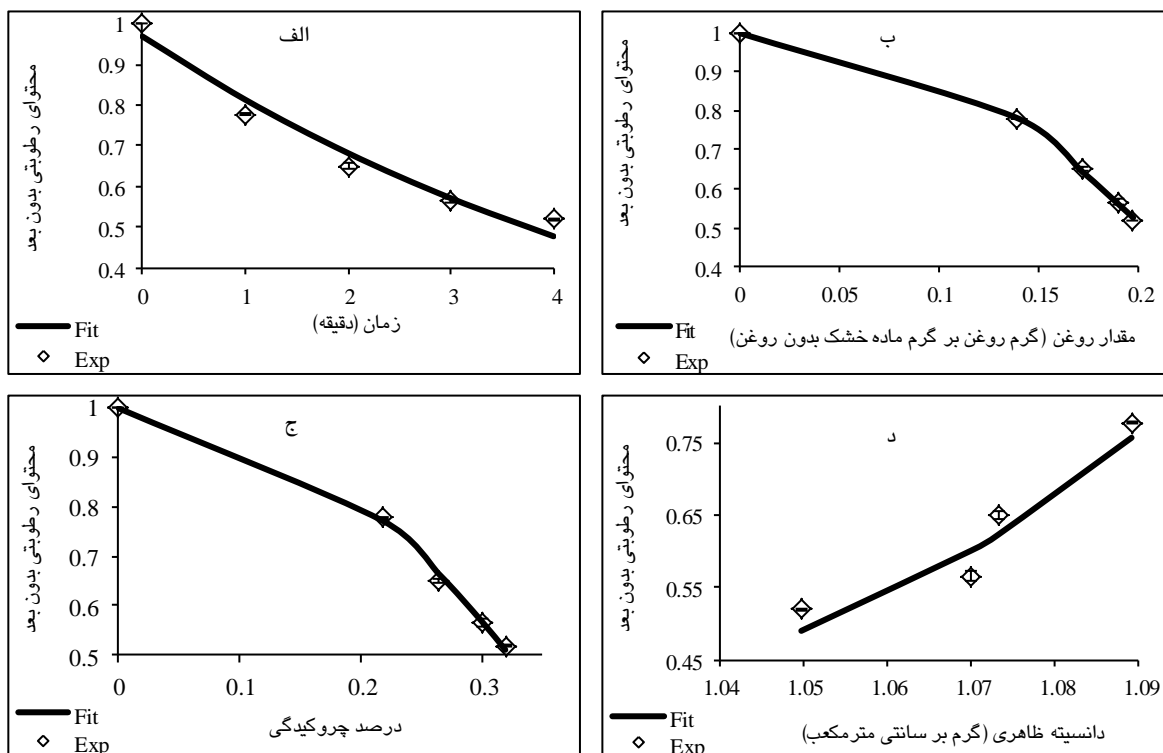
$$M_t = aS^2 + b \quad (9)$$

$$M_t = (-ab\rho)/(b+\rho) \quad (10)$$

شکل ۳، مدل‌سازی نمونه شاهد سرخ‌شده در دمای 150°C را با مدل‌های پیشنهادی ۱، ۸، ۹ و ۱۰ که به ترتیب به صورت تابعی از محتوای رطوبت بر حسب زمان، میزان روغن، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری می‌باشند، به عنوان نمونه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ و پارامترهای آماری حاصل از مدل‌سازی با مدل‌های ۱۰-۱ که در جدول ۴ آورده شده‌اند، ملاحظه می‌شود که مدل‌های پیشنهادی ضریب تبیین بالایی دارند. با توجه به شکل ۳- الف و همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد محتوای رطوبت بدون بعد در طول زمان کاهش می‌یابد. از شکل ۳- ب نیز پیداست که با کاهش محتوای رطوبت، میزان جذب روغن افزایش می‌یابد. این اثر را می‌توان با مکانیسم جایگزینی روغن به جای رطوبت توجیه کرد (دانا و ساقی ۲۰۰۶). با توجه

کیلوژول بر مول) توسط ساراواکوس و مارولیس (۲۰۰۱) قرار می‌گیرد.

حاصل از این پژوهش، ۱۱/۳۵۵ - ۸/۱۵۳ کیلوژول بر مول می‌باشد که در محدوده گزارش شده (۴۳ - ۱۷



شکل ۳- مدل‌سازی محتوای رطوبت بدون بعد نمونه شاهد سرخ‌شده در دمای ۱۵۰°C به صورت تابعی از: الف) زمان، ب) محتوای روغن، ج) میزان چروکیدگی و د) دانسیته ظاهری با مدل‌های ۳، ۸، ۹ و ۱۰

جدول ۴- پارامترهای بدست آمده از مدل‌سازی محتوای رطوبت بر حسب زمان (۷-۱)، جذب روغن (۸)، چروکیدگی (۹) و دانسیته ظاهری (۱۰)

مدل ۱	دما (°C)											
	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³
تیمار												
Control	-۰/۱۸۸	-	-۰/۹۶	۲۹/۶۳	-۰/۲۲	-	-۰/۹۴	۵۰/۲	-۰/۲۵	-	-۰/۹۵	۴۹/۹
0.1CMC	-۰/۱۷۷	-	-۰/۹۸	۲۶/۸	-۰/۲۱	-	-۰/۹۶	۲۹/۶	-۰/۲۴	-	-۰/۹۶	۴۲/۱
0.2CMC	-۰/۱۶۸	-	-۰/۹۹	۱۶/۲	-۰/۲	-	-۰/۹۷	۳۴/۱	-۰/۲۳	-	-۰/۹۷	۳۶/۳
U	-۰/۱۹۹	-	-۰/۹۹	۱۹/۵	-۰/۲۳	-	-۰/۹۹	۲۲/۸	-۰/۲۶	-	-۰/۹۹	۱۹/۶
U-0.1CMC	-۰/۱۹۲	-	-۰/۹۹	۲۳/۷	-۰/۲۲	-	-۰/۹۹	۱۸/۳	-۰/۲۵	-	-۰/۹۹	۱۱/۹
U-0.2CMC	-۰/۱۸۸	-	-۰/۹۹	۲۶/۱	-۰/۲۱	-	-۰/۹۹	۱۸/۸	-۰/۲۵	-	-۰/۹۹	۱۲/۵
مدل ۲	دما (°C)											
تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	-۰/۲۲۱	-۰/۰۲۱۴	-۰/۹۹	۱۶/۶	-۰/۲۴۹	-۰/۰۲۴۵	-۰/۹۸	۳۴/۷	-۰/۲۶۸	-۰/۰۲۵۱	-۰/۹۷	۴۵/۵
0.1CMC	-۰/۱۹۹	-۰/۰۱۷۷	-۰/۹۹	۹/۷۲	-۰/۲۲۱	-۰/۰۲۱۴	-۰/۹۸	۲۹/۹	-۰/۲۴۸	-۰/۰۲۱۷	-۰/۹۷	۴۴/۳
0.2CMC	-۰/۱۷۸	-۰/۰۱۳۷	-۰/۹۹	۱۰/۰۱	-۰/۲۱۹	-۰/۰۱۹۳	-۰/۹۸	۲۹/۲	-۰/۲۳۶	-۰/۰۱۹۷	-۰/۹۸	۴۰/۶
U	-۰/۱۸۴	-۰/۰۱۰۵	-۰/۹۹	۱۹/۲	-۰/۲۳۱	-۰/۰۱۸۹	-۰/۹۹	۱۸/۳	-۰/۲۵۱	-۰/۰۱۹۸	-۰/۹۹	۲۵/۲
U-0.1CMC	-۰/۱۷	-۰/۰۰۷۵	-۰/۹۹	۲۱/۹	-۰/۲۱۶	-۰/۰۱۵۹	-۰/۹۹	۱۹/۵	-۰/۲۳۴	-۰/۰۱۶۷	-۰/۹۹	۱۹/۱
U-0.2CMC	-۰/۱۵۹	-۰/۰۰۵۱	-۰/۹۹	۲۱/۶	-۰/۲۰۴	-۰/۰۱۳۷	-۰/۹۹	۲۱/۱	-۰/۲۳۰	-۰/۰۱۶	-۰/۹۹	۱۹/۴

مدل ۳

دما (°C)

تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	-۰/۰۳۱	-۰/۱۶۹	۰/۹۷	۴۰/۹	-۰/۰۴۱	-۰/۱۹۲	۰/۹۵	۵۲/۲	-۰/۰۳۸۲	-۰/۲۲۴	۰/۹۶	۵۲/۸
0.1CMC	-۰/۰۱۹۷	-۰/۱۶۵	۰/۹۸	۲۸/۱	-۰/۰۳۲۲	-۰/۱۸۷	۰/۹۷	۴۰/۹	-۰/۰۳۲۵	-۰/۲۱۶	۰/۹۷	۴۴/۳
0.2CMC	-۰/۰۰۸۹	-۰/۱۶۳	۰/۹۹	۱۷/۸	-۰/۰۲۸۲	-۰/۱۸۴	۰/۹۸	۳۵/۱	-۰/۰۲۷۲	-۰/۲۱۳	۰/۹۸	۲۸/۳
U	۰/۰۱۲۶	-۰/۲۰۸	۰/۹۹	۲۱	-۰/۰۰۶۴	-۰/۲۲۵	۰/۹۹	۲۶	-۰/۰۱۴	-۰/۲۵۳	۰/۹۹	۲۰/۹
U-0.1CMC	۰/۰۱۷۵	-۰/۲۰۴	۰/۹۹	۹۸۸	-۰/۰۰۱۹	-۰/۲۲۰	۰/۹۹	۲۱/۱	-۰/۰۰۷۴	-۰/۲۴۸	۰/۹۹	۱۲/۹
U-0.2CMC	-۰/۰۲۰۶	-۰/۲۰۱	۰/۹۹	۲۶/۹	-۰/۰۲۹۸	-۰/۲۱۸	۰/۹۹	۲۱/۵	-۰/۰۰۶۶	-۰/۲۴۶	۰/۹۹	۱۳/۸

مدل ۴

دما (°C)

تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	-۱/۴۲۸	۴/۶۳۲	۰/۹۹	۳/۵	-۱/۴۰۱	۳/۵۰۶	۰/۹۹	۶/۹۵	-۱/۷۳۷	۴/۰۴۶	۰/۹۹	۱۷
0.1CMC	-۱/۸۸۴	۷/۶۳۶	۰/۹۹	۵/۰۲	-۱/۶۴	۴/۹۳۱	۰/۹۹	۱۰	-۲/۰۲۹	۵/۵۶۹	۰/۹۹	۲۳/۷
0.2CMC	-۳/۱۸۴	۱۵/۸۸	۰/۹۹	۹/۵۴	-۱/۸۴۷	۶/۱۶۴	۰/۹۹	۱۳/۵	-۲/۳۹۳	۷/۳۶۵	۰/۹۹	۲۴/۶
U	-۳۳/۶۳	۱۶۵/۵	۰/۹۹	۲۳/۴	-۴/۴۹۹	۱۶/۷۱	۰/۹۹	۱۸/۹	-۵/۳۶۴	۱۷/۴۳	۰/۹۹	۱۳/۹
U-0.1CMC	-۴۵/۹۶	۲۳۵/۹	۰/۹۹	۲۸/۱	-۸/۰۸۲	۳۳/۵۳	۰/۹۹	۱۸/۹	-۱۴/۳۴	۵۳/۶۱	۰/۹۹	۱۲/۳
U-0.2CMC	-۵۹/۶۹	۳۱۴/۸	۰/۹۹	۳۰/۹	-۲۵/۳۶	۱۱۴/۷	۰/۹۹	۲۱/۷	-۲۱/۴۶	۸۲/۵۸	۰/۹۹	۱۳/۸

مدل ۵

دما (°C)

تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	۰/۸۲۴	۰/۰۳۳۲	۰/۹۷	۳۹/۹	۰/۷۹۸	۰/۰۴۴۱	۰/۹۵۶	۵۰/۶	-۰/۷۶۵	۰/۰۴۲۶	۰/۹۶	۵۰/۹
0.1CMC	۰/۸۳۱	۰/۰۲۱۱	۰/۹۸	۲۷/۵	۰/۸۰۴	۰/۰۳۴۶	۰/۹۷۲	۳۹/۷	-۰/۷۷۴	۰/۰۳۵۳	۰/۹۷	۴۳/۱
0.2CMC	۰/۸۳۵	۰/۰۰۹۷	۰/۹۹	۱۷/۶	۰/۸۰۹	۰/۰۲۹۹	۰/۹۷۹	۳۴/۲	-۰/۷۷۹	۰/۰۲۹۲	۰/۹۸	۳۷/۴
U	۰/۷۹۵	-۰/۰۱۲۶	۰/۹۹	۲۰/۹	۰/۷۷۴	۰/۰۰۸۵	۰/۹۹۱	۲۵/۷	-۰/۷۴۲	۰/۰۱۶	۰/۹۹	۲۰/۲
U-0.1CMC	۰/۸۰۱	-۰/۰۱۸۱	۰/۹۹	۲۴/۴	۰/۷۷۹	۰/۰۰۳۱	۰/۹۹۴	۲۱	-۰/۷۴۹	۰/۰۰۷۷	۰/۹۹	۱۲/۸
U-0.2CMC	۰/۸۰۴	-۰/۰۲۱۶	۰/۹۹	۲۶/۴	۰/۷۸۳	-۰/۰۰۳۵	۰/۹۹۳	۲۱/۵	-۰/۷۵۲	۰/۰۰۶۶	۰/۹۹	۱۳/۷

ادامه جدول ۴

مدل ۶

دما (°C)

تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	-۱۱/۶۸	۱۲/۱۳	۰/۹۶	۴۳/۹	-۱۰/۲۴	۱۰/۷۸	۰/۹۵	۵۵/۹	-۸/۹۳	۹/۳۹	۰/۹۵	۵۷/۷
0.1CMC	-۱۲/۱۲	۱۲/۴۳	۰/۹۸	۳۱/۲	-۱۰/۵۷	۱۱/۰۱	۰/۹۶	۴۴/۴	-۹/۲۴	۹/۶۴	۰/۹۷	۴۸/۳
0.2CMC	-۱۲/۴۷	۱۲/۶۳	۰/۹۹	۲۰/۶	-۱۰/۷۹	۱۱/۱۷	۰/۹۷	۳۸/۲	-۹/۴۲	۹/۷۷	۰/۹۷	۴۱/۸
U	-۱۰/۲۲	۱۰/۱۴	۰/۹۹	۲۱/۲	-۹/۳۱۱	۹/۴۵	۰/۹۹	۲۱/۷	-۸/۲۳۶	۸/۴۳	۰/۹۹۱	۲۷/۳
U-0.1CMC	-۱۰/۴۸	۱۰/۳۳	۰/۹۹	۲۳/۱	-۹/۵۲	۹/۶۰	۰/۹۹	۲۵/۱	-۸/۴۴	۸/۵۷	۰/۹۹	۱۷/۱
U-0.2CMC	-۱۰/۶۵	۱۰/۴۵	۰/۹۹	۲۴/۱	-۹/۶۶۷	۹/۶۸	۰/۹۹	۲۳/۷	-۸/۵۱۴	۸/۶۳	۰/۹۹	۱۶/۵

مدل ۷

دما (°C)

تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	-۰/۰۸۳۹	-۰/۳۹۸	۰/۹۹	۱۶/۶	۰/۱۱۷	۰/۵۲۵	۰/۹۹	۳۴/۷	۰/۰۷۰	۰/۵۱۱	۰/۹۷	۴۵/۵
0.1CMC	-۰/۰۲۴۸	-۰/۲۷۵	۰/۹۹	۹/۷۲	۰/۰۶۱۹	۰/۴۰۱	۰/۹۹	۲۹/۹	۰/۰۲۷۹	۰/۴۰۱	۰/۹۷	۴۴/۳
0.2CMC	-۰/۰۲۳۶	-۰/۱۷۹	۰/۹۹	۱۰/۰۱	۰/۰۳۴۸	۰/۳۴	۰/۹۹	۲۹/۲	۰/۰۰۴۵	-۰/۳۳۲	۰/۹۸	۴۰/۶
U	-۰/۱۰۱	-۰/۰۸۹	۰/۹۹	۱۹/۲	۰/۰۵۰۹	۰/۲۲۶	۰/۹۹	۱۸/۳	۰/۰۶۶	-۰/۲۵۱	۰/۹۹	۲۵/۲
U-0.1CMC	-۰/۱۱۳	-۰/۰۵۸	۰/۹۹	۲۱/۹	۰/۰۷۰۲	۰/۱۷۷	۰/۹۹	۱۹/۵	۰/۰۸۹	-۰/۱۸۷	۰/۹۹	۱۹/۱
U-0.2CMC	-۰/۱۲۱	-۰/۰۳۷	۰/۹۹	۲۱/۶	۰/۰۸۶	۰/۱۳۸	۰/۹۹	۲۱/۱	۰/۰۹۳	-۰/۱۷۵	۰/۹۹	۱۹/۴

مدل ۸

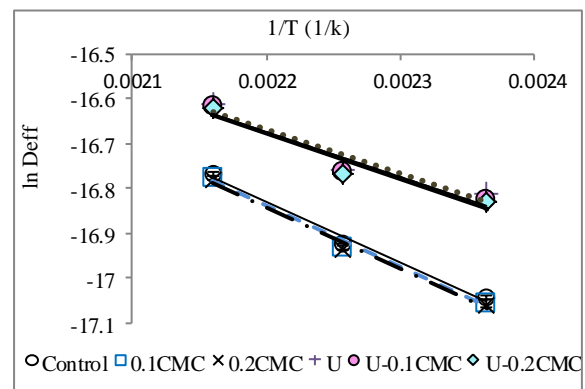
دما (°C)

تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰					
	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	c	R ²

مدل ۹	دمای (°C)														
	۱۵۰					۱۷۰					۱۹۰				
تیمار	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	-۴/۸	۰/۹۹	-	۰/۹۹	۹/۶	-۳/۹	۰/۹۶	-	۰/۹۶	۴۵/۳	-۴/۲	۱/۰۱	-	۰/۹۸۸	۲۹/۷
0.1CMC	-۶	۰/۹۹	-	۰/۹۹	۲۰/۱	-۵/۴	۰/۹۹	-	۰/۹۹	۲۵/۴	-۵/۶	۱/۰۱	-	۰/۹۸۲	۳۵/۱
0.2CMC	-۶/۲	۱/۰۱	-	۰/۹۹	۱۶	-۶	۱	-	۰/۹۸	۳۱/۷	-۶/۲	۱/۰۱	-	۰/۹۹۱	۲۴/۲
U	-۷/۸	۱/۰۵	-	۰/۹۲	۷۲/۹	-۷/۱	۱/۰۲	-	۰/۹۴	۶۵/۱	-۷/۵	۱/۰۴	-	۰/۹۲۵	۷۹
U-0.1CMC	-۸/۸	۱/۰۵	-	۰/۹۲	۷۰/۷	-۷/۷	۱/۰۳	-	۰/۹۷	۴۸/۲	-۸/۵	۱/۰۴	-	۰/۹۳	۷۶/۵
U-0.2CMC	-۹	۱/۰۴	-	۰/۹۵	۵۸/۴	-۷	۱/۰۳	-	۰/۹۷	۴۸/۳	-۷/۱	۱/۰۴	-	۰/۹۶۴	۵۴/۶

مدل ۱۰	دمای (°C)														
	۱۵۰					۱۷۰					۱۹۰				
تیمار	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³	a	b	c	R ²	RMSE ×10 ⁻³
Control	-۰/۰۴۹	-۱/۱۷	-	۰/۹۳	۳۷/۷	-۰/۰۵۷	-۱/۱۸	-	۰/۹۵	۳۰/۹	-۰/۰۷	-۱/۲۲	-	۰/۹۳	۳۸/۷
0.1CMC	-۰/۰۵	-۱/۱۶	-	۰/۹۶	۲۹/۶	-۰/۱۶۱	-۱/۴۲	-	۰/۹۰	۴۵/۵	-۰/۱۱۶	-۱/۲۸	-	۰/۹۶	۳۰/۴
0.2CMC	-۰/۱	-۱/۲۵	-	۰/۹۳	۵۹	-۰/۱۶۵	-۱/۴۱	-	۰/۹۲	۴۲/۶	-۰/۱۵	-۱/۳۷	-	۰/۹۸	۲۶/۱
U	-۰/۰۷۸	-۱/۲۱	-	۰/۹۲	۵۸/۷	-۰/۱۴۷	-۱/۳۷	-	۰/۹۱	۵۷	-۰/۱۶	-۱/۴۶	-	۰/۹۷	۳۱/۶
U-0.1CMC	-۰/۰۸۱	-۱/۲	-	۰/۹۷	۳۵/۹	-۰/۱۵۳	-۱/۳۵	-	۰/۹۲	۵۷/۱	-۰/۱۳۵	-۱/۳۱	-	۰/۹۵	۴۵/۱
U-0.2CMC	-۰/۰۸۲	-۱/۲	-	۰/۹۷	۳۷/۹	-۰/۱۴	-۱/۳۱	-	۰/۹۶	۴۱/۲	-۰/۱۳۶	-۱/۳۱	-	۰/۹۶	۴۳/۳

شکل ۵، مقادیر میانگین رطوبت بدون بعد آزمایشی را در مقابل همان پارامتر که از قانون فیک به دست آمده، نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، قانون انتشار فیک، تبیین خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و این مدل با همه پیش‌تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش، هماهنگی خوبی نشان می‌دهد ($R^2_{average} = ۰/۹۷۳$).



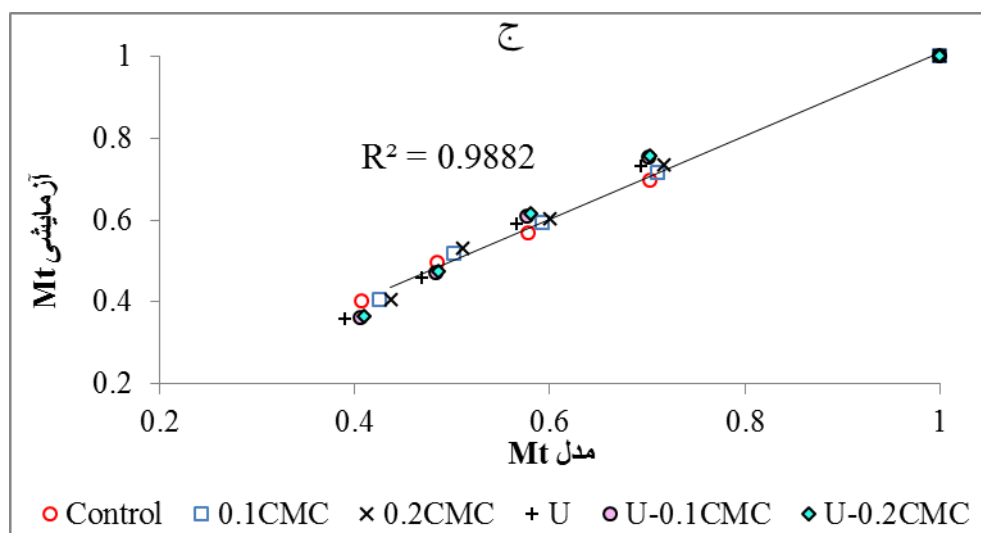
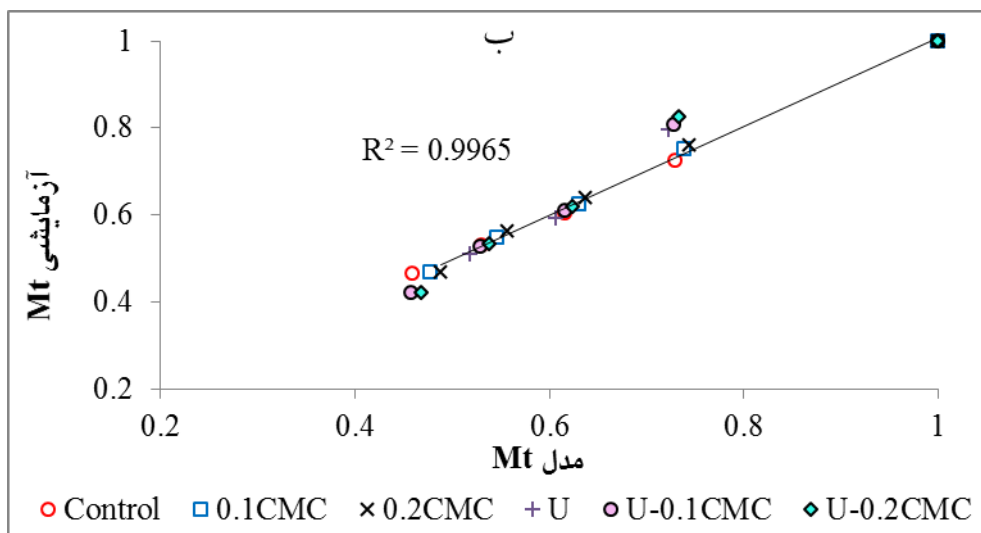
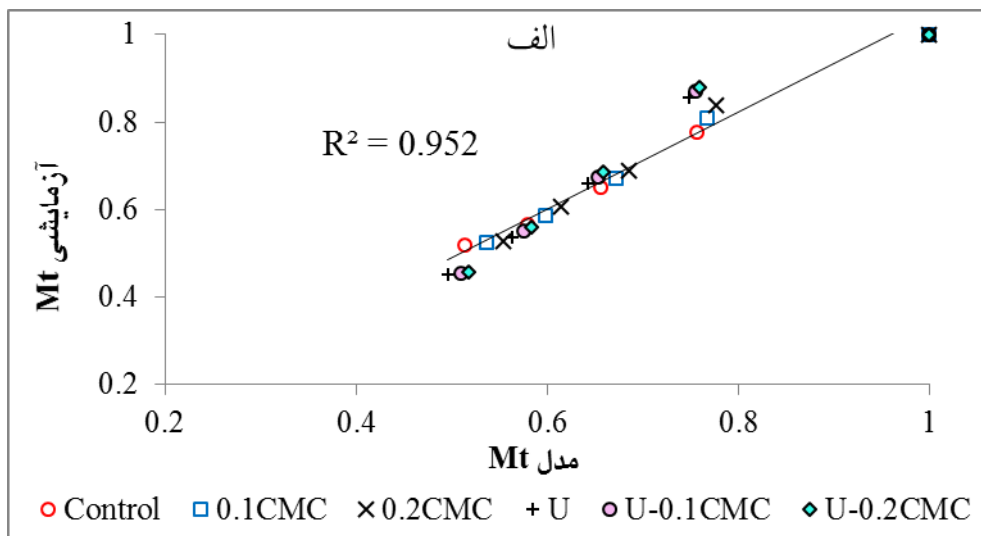
شکل ۴- منحنی تغییرات D_{eff} در سه دمای مختلف بر طبق معادله آرنیوس در حین سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب-زمینی در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

جدول ۵- مقادیر فاکتور پیش‌نمایی و انرژی فعال‌سازی برای D_{eff} طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده

پیش‌تیمار	D_{eff} (m ² /s)		
	D_0 (m ² /s) × 10 ^{-۷}	E_a (kJ/mol)	R^2
Control	۹/۵۴	-۱۱/۲۴۶ ^a ± ۰/۰۱۵	۰/۹۹
0.1CMC	۹/۷۸	-۱۱/۳۴۴ ^a ± ۰/۶۴۴	۰/۹۹
0.2CMC	۹/۵۸	-۱۱/۳۵۵ ^a ± ۰/۴۱۸	۰/۹۹
U	۵/۰۲	-۸/۱۵۳ ^b ± ۰/۰۶۸	۰/۹۲
U-0.1CMC	۵/۳۱	-۸/۴۵۴ ^b ± ۰/۱۹۳	۰/۹۴
U-0.2CMC	۵/۳۶	-۸/۴۸۰ ^b ± ۰/۰۷۷	۰/۹۴

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با کربوکسی‌متیل‌سلولز با غلظت ۰/۱ و ۰/۲٪، فراصوت و فراصوت-کربوکسی-متیل‌سلولز ۰/۱ و ۰/۲٪، افزایش دما، باعث کاهش محتوای رطوبت نمونه‌ها در همه زمان‌ها می‌شود. همچنین، در بین پیش‌تیمارها، محتوای رطوبت نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فراصوت و فراصوت-کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۱ و ۰/۲٪ در دو دقیقه اول، بیشتر از محتوای رطوبت نمونه شاهد بود ولی رفته رفته با پیشرفت زمان، محتوای رطوبت تمامی پیش-تیمارها به رطوبت تعادلی نزدیک شده و تفاوت آنها از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. با توجه به کاهش محتوای رطوبت در پیش‌تیمارهای مذکور و ارتباط بین کاهش رطوبت و جذب روغن می‌توان استنباط نمود که پیش-تیمار پوشش خوراکی در هر دو غلظت و فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، هم بصورت مجزا و هم بصورت تلفیقی، باعث کاهش جذب روغن می‌شوند. در بررسی تأثیر دما روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت، مشاهده شد که دمای سرخ‌کردن به‌طور معنی‌داری باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت می‌شود. همچنین، در بین پیش‌تیمارها، فراصوت تنها و فراصوت-کربوکسی-متیل‌سلولز در غلظت ۰/۲٪ و ۰/۱٪ باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شدند و این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین با توجه به مقادیر محاسبه شده انرژی فعال‌سازی ملاحظه شد که نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت، کمترین انرژی فعال‌سازی را نیاز دارند. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که قانون فیک و مدل‌های پیشنهادی، قادر به برازش داده‌های آزمایشی در پیش‌تیمارهای مورد مطالعه، با ضریب تبیین بالا هستند.



شکل ۵- مقادیر میانگین M_t آزمایشی در مقابل M_d به دست آمده از مدل انتشار فیک در حین سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب-زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵۰ (الف)، ۱۷۰ (ب) و ۱۹۰°C (ج) در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

منابع مورد استفاده

- دارائی گرمه‌خانی ا، میرزایی ح، کاشانی نژاد م و مقصدلو ی، ۱۳۸۷. استفاده از مواد هیدروکلوئیدی به عنوان پوشش‌های خوراکی به منظور تولید چیپس کم چرب. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد پانزدهم، شماره ۶.
- دارائی گرمه‌خانی ا، میرزایی ح، مقصدلو ی و کاشانی نژاد م، ۱۳۸۸. تأثیر مواد هیدروکلوئیدی بر جذب روغن و خواص کیفی خلال نیمه سرخ‌شده سیب زمینی. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد شانزدهم، شماره ۳.
- علی‌پور م، کاشانی نژاد م، مقصدلو ی و جعفری م، ۱۳۸۸. بررسی اثر کاراگینان، دمای روغن و زمان سرخ‌کردن بر میزان جذب روغن در محصولات سرخ‌شده سیب‌زمینی. نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی ایران، جلد پنجم، شماره ۱. صفحه‌های ۲۱ تا ۲۷.
- Aguilera JM, 2005. Why food microstructure? *Journal of Food Engineering* 67: 3–11.
- Annapure US, Singhal RS and Kulkarni PR, 1999. Screening of hydrocolloids for reduction in oil uptake of a model deep fat fried product. *Fett/Lipid* 101(6): 217-221.
- AOAC, 1984. The official methods of analysis. Method 28.074 (14th ed). Arlington, VA: AOAC.
- AOAC, 1995. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA.
- Bajaj I and Singhal R, 2007. Gellan gum for reducing oil uptake in sev, a legume based product during deep-fat frying. *Food Chemistry* 104(4): 1472-1477.
- Bravo J, Ruales NSJ and Mulet A, 2009. Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. *Drying Technology* 27: 782-786.
- Budzaki S and Seruga B, 2005. Moisture loss and oil uptake during deep fat frying of “krostula” dough. *European Food Research and Technology* 220: 90–95.
- Costa RM and Oliveira FAR, 1999. Modelling the kinetics of water loss during potato frying with a compartmental dynamic model. *Journal of Food Engineering* 41: 177-185.
- Crank J, 1975. *The Mathematics of Diffusion* (2nd Edition). Oxford, Clarendon Press.
- Donhowe IG and Fennema OR, 1993. The effects of plasticizers on crystallinity, permeability, and mechanical properties of methylcellulose films. *Journal of Food Processing and Preservation* 17: 247 – 257.
- Fernandes FAN and Rodrigue S, 2008. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. *Drying Technology* 26: 1509-1516.
- Fernandes FAN, Gallão MI and Rodrigues S, 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering* 90(2): 186-190.
- Garcia MA, Ferrero C, Bértola N, Martino M and Zaritzky N, 2002. Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 3(4): 391-397.
- Kock SD, Minnar A, Berry D and Taylor JRN, 1995. The effect of freezing rate on the quality of cellular and non-cellular par-cooked starchy convenience foods. *LWT - Food Science and Technology* 28: 87-95.
- Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB and Marinos-Kouris D, 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering* 44: 39–46.
- Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB and Marinos-Kouris D, 2001. Effect of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering* 49: 347-354.
- Lamberg I, Hallstorm B and Olsson H, 1990. Fat uptake in a potato drying/frying process. *LWT - Food Science and Technology* 23(4): 295-300.
- Mallikarjunan P, Chinnan MS, and Balasubramaniam VM, 1995. Modeling deep-fat frying of chicken coated with edible films. *IFT Annual Meeting, Paper No. 2-87*.
- Mellema M, 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science and Technology* 14(9): 364-373.

- Moreira RG, Castell-Perez ME and Barrufet MA, 1999. Deep-fat frying: fundamentals and applications. Aspen Publishers, Gaithersburg, Ma 6(98): 179- 202.
- Moyano PC and Berna AZ, 2002. Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technology* 20(7): 1303-1318.
- Moyano PC and Pedreschi F, 2006. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT - Food Science and Technology* 39: 285-291.
- Pedreschi F, Hernandez P, Figueroa C and Moyano PC, 2005. Modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties* 8: 289-299.
- Rodrigues S, Oliveira FIP and Gallao MI, 2009. Effect of immersion time in osmosis and ultrasound on papaya cell structure during dehydration. *Drying Technology* 27(2): 220-225.
- Rumsey T and Krochta J, 1994. Mathematical modeling of moisture transfer in food systems with edible coatings: In edible coatings and films to improve food quality. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA 337-356.
- Sahin S, Sastry SK and Bayindirli L, 1999. The determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering* 39: 307–311.
- Saravacos GD and Maroulis ZA, 2001. *Transport Properties of Foods*, Marcel Dekker: New York.
- SAS, 2005. Statistical analysis system, version 9.1.3 SP4, SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Steel RGD, Torrie JH and Dickey DA, 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. New York: McGraw-Hill.
- Troncoso E and Pedreschi F, 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT - Food Science and Technology* 42: 1164-1173.
- Williams R, 1997. Reducing fat absorption in fried foods using edible films. MS Thesis. Guelph, Canada: University of Guelph.
- Williams R and Mittal GS, 1999. Low-fat fried foods with edible coatings: Modeling and simulation. *Journal of Food Science* 64(2): 317-322.
- Williams R and Mittal GS, 1999. Water and fat transfer properties of polysaccharide films on fried pastry mix. *LWT - Food Science and Technology* 32: 440-445.
- Ziaiiifar AM, Achir N, Courtois F, Trezzani I, and Trystram G, 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science and Technology* 43(8):1410-1423.
- Ziaiiifar AM, Courtois F, and Trystram G, 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering* 33(2):191-212.