

تأثیر ترکیبی پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبگیری اسمزی روی سینتیک دفع رطوبت طی سرخ کردن عمیق سیب‌زمینی

مهدی برمور^۱، جلال دهقان‌نیا^{۲*} و بابک قنبرزاده^۲

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۱

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

^۲ به ترتیب دانشیار و استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

چکیده

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی دفع رطوبت طی سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با اولتراسوند (فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۰ و ۳۰ دقیقه)، مایکروویو (توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه) و آبگیری اسمزی (محلول سدیم کلرید با غلظت‌های ۱ و ۳ درصد و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت) بود. از قانون دیفوزیون فیک برای مدل‌سازی دفع رطوبت طی فرآیند سرخ‌کردن استفاده شد. پیش‌تیمار اولتراسوند به مدت ۱۰ دقیقه، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و سرعت خروج رطوبت از سیب‌زمینی را کاهش داد. علاوه بر این، از تعدادی مدل تجربی پیشنهادی نیز برای مدل‌سازی دفع رطوبت حین فرآیند استفاده شد. همچنین، با استفاده از رابطه آرنیوس، تأثیر دما بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت بررسی شد. با افزایش دمای سرخ‌کردن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت به صورت لگاریتمی افزایش پیدا کرد. در طرف دیگر، با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، ضرایب ثابت مدل‌های دفع رطوبت وابسته به شرایط مختلف فرآیند (غلظت محلول اسمزی، زمان اولتراسوند، توان مایکروویو و دمای سرخ‌کردن) به دست آمدند. در حالت کلی، اعمال پیش‌تیمارهای مایکروویو و آبگیری اسمزی و همچنین تلفیق پیش‌تیمارهای مذکور با اولتراسوند، محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب‌زمینی را کاهش داد.

واژگان کلیدی: دفع رطوبت، اولتراسوند، آبگیری اسمزی، مایکروویو، مدل‌سازی

مقدمه

محصول را نیز افزایش می‌دهد (ملما ۲۰۰۳). در سال‌های اخیر، پژوهش‌گران مختلفی در جهت بهبود بخشیدن به کیفیت محصولات سرخ‌شده پژوهش‌های متعددی انجام داده‌اند. این پژوهش‌گران، ضمن کاهش دادن محتوای رطوبت محصول از طریق یکسری پیش‌تیمارها، میزان جذب روغن را در محصول سرخ‌شده نیز کم کرده و

سرخ‌کردن عمیق، یک روش رایج در آماده‌سازی سریع مواد غذایی با ویژگی‌های حسی مطلوب می‌باشد ولی مصرف روغن، از نقطه نظر تغذیه‌ای، عامل اصلی اضافه وزن و بیماری‌های قلبی در افراد شناخته شده است. از طرف دیگر، روغن بیشتر در ماده غذایی سرخ‌شده، قیمت

۱- باعث کاهش انتقال جرم از طریق خروج کمتر رطوبت از ماده غذایی شده و در نتیجه، میزان جذب روغن محصول را کم می‌کند.

۲- باعث ژلاتینیزاسیون بیشتر مواد جامد حین سرخ‌کردن شده و در نتیجه، راههای نفوذ روغن به داخل ماده غذایی گرفته می‌شود.

یکی از راههای بهبود خروج یکنواخت رطوبت هنگام سرخ‌کردن و همچنین، افزایش خصوصیات کیفی و حسی محصول سرخ‌شده نهایی، استفاده از پیش‌تیمارهای مایکروویو و آبیگری اسمزی می‌باشد. حرارت‌دهی به وسیله امواج مایکروویو در مقایسه با روش‌های معمول، دارای مزایای بیشتری می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به نذیره انرژی، کاهش مدت زمان پخت و گرمادهی، گرمادهی یکنواخت، حذف دوره نزولی سرعت خشک‌کردن به دلیل حرارت‌دهی از مرکز ماده غذایی به سطح و در نتیجه تقویت ساختارهای درونی و سینتیک انتقال جرم اشاره کرد (کلارک و همکاران ۲۰۰۰؛ انگادی و همکاران ۲۰۰۹). آبیگری اسمزی قبل از سرخ‌کردن نیز با هدف کاهش محتوای رطوبت اولیه ماده غذایی صورت می‌گیرد. در این فرآیند، همزمان با خروج رطوبت از داخل ماده غذایی، مواد جامد محلول اسمزی نیز به داخل ماده غذایی نفوذ کرده و درصد مواد جامد خشک آن را افزایش می‌دهد (کروکیدا و همکاران ۲۰۱۸). همچنین، آبیگری اسمزی از کاهش رنگ مطلوب نهایی ماده غذایی جلوگیری می‌کند (کروکیدا و همکاران ۱۹۹۸). در مورد تأثیر اولتراسوند به عنوان پیش‌تیمار در زمینه خشک‌کردن جهت بهبود بخشیدن به پدیده انتقال جرم و اثر آن روی ضریب انتشار موثر رطوبت، مطالعاتی انجام گرفته است. در پژوهشی، اثر اولتراسوند به عنوان پیش‌تیمار در خشک‌کردن آناناس بررسی شد (فرناندز و همکاران ۲۰۰۸). در این مطالعه، قطعات آناناس در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، در برابر امواج اولتراسوند با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و شدت ۴۸۷۰ وات بر متر مربع به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه قرار گرفتند. نتایج به دست آمده

خصوصیات حسی و کیفی آن را بهبود بخشیده‌اند (کروکیدا و همکاران ۲۰۱۸). خضری‌پورعرب و همکاران (۱۳۹۴)، اثر صمغ عربی و پلی‌ساکارید محلول در آب سویا را تحت شرایط مختلف بر میزان رطوبت، جذب روغن، رنگ، تردی و ویژگی‌های حسی خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده با استفاده از روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار دادند. با افزایش دما و زمان سرخ‌کردن محتوی رطوبت کاهش ولی میزان جذب روغن و تردی افزایش یافت. ولی، ویژگی‌های رنگی و حسی خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده حاوی پوشش تفاوتی با خلال‌های بدون پوشش نداشتند. بیکی و همدمی (۱۳۹۵)، تأثیر آنزیم‌بری، پیش‌خشک‌کردن و شرایط سرخ‌کردن روی ویژگی‌های کیفی خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده را مطالعه کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که کمترین محتوای روغن و همچنین، مطلوب‌ترین ویژگی‌های رنگی و بافتی در کلیه تیمارهای سرخ‌کردن مربوط به خلال‌های آنزیم‌بری و پیش‌خشک‌شده بود. رونقی و همکاران (۱۳۹۵)، میزان جذب روغن طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با کربوکسی‌متیل سلولز و امواج فراصوت را بررسی کردند. پیش‌تیمار پوشش خوراکی و امواج فراصوت هر دو باعث کاهش جذب روغن شدند. تلفیق این دو پیش‌تیمار نیز باعث کاهش بیشتر جذب روغن نسبت به بقیه نمونه‌ها شد.

محتوای مواد جامد اولیه ماده غذایی، یک فاکتور بسیار مهم و بحرانی در خروج رطوبت و میزان جذب روغن محصول سرخ‌شده نهایی می‌باشد (لولای و اور ۱۹۹۷). فرآیندهای مختلفی مثل خشک‌کردن به وسیله هوای داغ، خشک‌کردن به وسیله امواج فرسرخ، مایکروویو و آبیگری اسمزی می‌توانند محتوای رطوبت اولیه ماده غذایی را کم کرده و در نتیجه مواد جامد خشک را افزایش دهند. افزایش مواد جامد به دو صورت می‌تواند میزان جذب روغن را در محصول سرخ‌شده کاهش دهد (کروکیدا و همکاران ۲۰۱۸):

مایکروویو روی کاهش محتوای رطوبت قطعات سیب-زمینی حین سرخ‌کردن و همچنین، مدل‌سازی محتوای رطوبت به صورت تابعی از زمان، دانسیته ظاهری، چروکیدگی و روغن بود.

مواد و روش‌ها

سیب‌زمینی‌های مورد استفاده، از بازار محلی تهیه و قبل از سرخ‌شدن در سردخانه بالای صفر درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی که مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه بود، برای سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی به کار برده شد.

تجهیزات

در این پژوهش، از یک سرخ‌کن Moulinex (مدل F430R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد)، دستگاه اولتراسوند (مدل USD-4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و همچنین زمان اولتراسونیکاسیون)، دستگاه مایکروویو (سامسونگ مدل CS4550، ساخت کره) و هیتر (مدل Tap-210-HS، ساخت ایران، مجهز به سیستم تنظیم دما در ۴۰ درجه سانتی-گراد) استفاده شد.

آماده‌سازی سیب‌زمینی‌ها

سیب‌زمینی‌ها بعد از شستشو، پوست‌گیری شده و با استفاده از یک کاتر دستی به قطعاتی با ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 4$ سانتی‌متر (ارتفاع، عرض و طول)، برش داده شدند. سپس با استفاده از آب مقطر ناشسته سطحی آن‌ها گرفته شده و بعد از آن آب اضافی سیب‌زمینی‌ها با استفاده از کاغذ رطوبت‌گیر حذف شد.

پیش‌تیمارها

جدول ۱، علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد.

الف: پیش‌تیمار اولتراسوند. نمونه‌های لازم برای اولتراسونیکاسیون، ابتدا در حمام اولتراسوند در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۰ و ۳۰ دقیقه به طور

از این تحقیق نشان داد که میزان ضریب انتشار موثر رطوبت با گذشت زمان از 10×10^{-9} به $12/2 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ساعت افزایش یافته و باعث افزایش سرعت خروج رطوبت از ماده غذایی، موقع خشک‌کردن می‌شود. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که پیش‌تیمار اولتراسوند از طریق افزایش سرعت خروج رطوبت در حین سرخ‌کردن نیز باعث کاهش جذب روغن گردد. علاوه بر این، چروکیدگی، ارتباط قوی با محتوای رطوبتی نمونه‌ها دارد. با کاهش محتوای رطوبتی، چروکیدگی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری‌که در زمان‌های اولیه فرآیند، در اثر خروج سریع رطوبت آزاد موجود در نمونه غذایی، چروکیدگی خیلی سریع اتفاق می‌افتد و با گذشت زمان سرخ‌کردن، آهنگ وقوع این پدیده کاهش پیدا می‌کند (نقوی و همکاران ۱۳۹۲).

خروج رطوبت از داخل ماده غذایی هنگام سرخ‌کردن به سه حالت انتشار مولکولی^۱، جریان مویین^۲ و جریان فشاری^۳ به وقوع می‌پیوندد (نای و دتا ۱۹۹۹). در مطالعات انتقال جرم برای تشریح بهتر سینتیک خروج رطوبت از مواد غذایی طی سرخ‌کردن، از قانون فیک (معادله ۱) استفاده می‌شود (میتال و زانگ ۲۰۰۰):

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} \quad (1)$$

که در آن، m : محتوای رطوبت در لحظه t ، t : زمان سرخ‌کردن (s)، D_{eff} : ضریب انتشار موثر رطوبت (m^2/s) و x : موقعیتی از محصول که محتوای رطوبت در آنجا محاسبه می‌شود (m)، می‌باشد.

با توجه به اطلاعات موجود، تاکنون پژوهشی در ارتباط با تأثیر همزمان پیش‌تیمارهای آبیگری اسمزی، اولتراسوند و مایکروویو روی کاهش محتوای رطوبت قطعات سیب‌زمینی حین سرخ‌کردن صورت نگرفته است. بنابراین، هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر آبیگری اسمزی و تلفیق آن با پیش‌تیمارهای اولتراسوند و

1 Molecular diffusion
2 Capillary flow
3 Pressure driven flow

های ۱ و ۳ درصد و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت به طور مجزا قرار گرفتند.

د: پیش‌تیمار تلفیقی اولتراسوند، میکروویو و آبگیری اسمزی با محلول نمک. این نمونه‌ها نیز، ابتدا در داخل حمام اولتراسوند در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان‌های ۱۰ و ۳۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفته و سپس در داخل محلول اسمزی ۱ و ۳ درصد سدیم کلرید و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۳ ساعت آبگیری شده و در نهایت در آون میکروویو تحت توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه خشک شدند و سپس وارد مرحله سرخ‌شدن گردیدند.

مجزا قرار گرفته و بعد از عمل اولتراسونیکاسیون، آب اضافی موجود در سطح نمونه‌ها با کاغذ جاذب گرفته شده و نمونه‌ها وارد سرخ‌کن شدند.

ب: پیش‌تیمار میکروویو. این نمونه‌ها به منظور به حداقل رساندن محتوای رطوبت اولیه آنها، تحت توان ۵ وات بر گرم و مدت زمان ۵ دقیقه در آون میکروویو خشک شدند.

ج: پیش‌تیمار آبگیری اسمزی با محلول نمک. جهت کاهش محتوای رطوبت اولیه و افزایش ماده جامد سیب‌زمینی‌ها، نمونه‌ها در داخل محلول اسمزی سدیم کلرید با غلظت-

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

| علامت اختصاری | تیمار | ردیف |
|---------------|--|------|
| Control | شاهد | ۱ |
| U10 | اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه | ۲ |
| U30 | اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه | ۳ |
| O1 | آبگیری اسمزی با محلول نمک ۱ درصد | ۴ |
| O3 | آبگیری اسمزی با محلول نمک ۳ درصد | ۵ |
| M | مایکروویو | ۶ |
| O1U10M | آبگیری اسمزی با محلول نمک ۱ درصد - اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه - مایکروویو | ۷ |
| O1U30M | آبگیری اسمزی با محلول نمک ۱ درصد - اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه - مایکروویو | ۸ |
| O3U10M | آبگیری اسمزی با محلول نمک ۳ درصد - اولتراسوند با زمان ۱۰ دقیقه - مایکروویو | ۹ |
| O3U30M | آبگیری اسمزی با محلول نمک ۳ درصد - اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه - مایکروویو | ۱۰ |

شرایط سرخ‌کردن

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس جدول ۱، ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شده و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن مورد نظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به طوریکه پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای مورد نظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به میزان ۱۲۰ - ۱۰۰ گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند و سپس سبد حاوی نمونه‌ها، به طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ‌شدن به مدت زمان مورد نظر (در چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه و سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی-

گراد)، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شده و روغن اضافی آنها توسط یک کاغذ جاذب گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه بر روی آنها انجام گرفت. برای به حداقل رساندن تغییرات ویژگی‌های روغن با توجه به افت کمی و کیفی آن طی سرخ کردن، هر نمونه از روغن تنها به مدت ۳۰ دقیقه (هفت تا هشت بار سرخ کردن) استفاده شده و سپس، با روغن تازه جایگزین شد (رحیمی و انگادی ۲۰۱۴). تمامی آزمایش‌ها با ۲ تکرار انجام شد و داده‌های گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

در رابطه ϵ ، ρ دانسیته ظاهری محصول (gr/cm^3)، M جرم محصول (gr) و V حجم ظاهری محصول (cm^3) می باشد.

مدل سازی

مدل سازی دفع رطوبت با استفاده از مدل کرنک

با استفاده از مدل کرنک (معادله ۵) که از حل معادله فیک (معادله ۱) به دست آمده است، محتوای رطوبت بدون بعد در زمان های مختلف سرخ کردن قابل محاسبه است (فرانکو و همکاران ۲۰۰۷):

(۵)

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

در این رابطه، M محتوای رطوبت بدون بعد (نسبت رطوبتی)، D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s)، L نصف ضخامت سیب زمینی (m)، m_0 محتوای رطوبت اولیه محصول ($\frac{\text{gr water}}{\text{gr dry basis, oil free}}$)، m_t محتوای رطوبت در لحظه t ($\frac{\text{gr water}}{\text{gr dry basis, oil free}}$) و m_e محتوای رطوبت در لحظه تعادل ($\frac{\text{gr water}}{\text{gr dry basis, oil free}}$) می باشد. برای محاسبه D_{eff} داده های حاصل از آزمایش با استفاده از مدل کرنک و با استفاده از نرم افزار Maple 15 برازش داده شدند و مقادیر R^2 تحت شرایط مختلف آزمایش به دست آمد. مدل سازی ضریب انتشار مؤثر رطوبت وابسته به دما تأثیر دما بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت در فرآیند سرخ کردن، با استفاده از رابطه آرنیوس مشخص شد:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

در این رابطه، E_a انرژی فعال سازی ($\frac{\text{J}}{\text{mol}}$)، R ثابت جهانی گازهای کامل ($\frac{8.31441}{\text{mol K}}$)، T دما (K) و D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s) می باشد. لگاریتم

اندازه گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه ها، از طریق خشک کردن آن ها در آون کنوکسیون در دمای 105 ± 1 درجه سانتی گراد، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد و بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید (AOAC، ۱۹۹۵).

اندازه گیری محتوای روغن

میزان روغن نمونه های سرخ شده با استفاده از دستگاه سوکسله و از طریق استخراج به وسیله حلال پترولیوم اتر اندازه گیری شد و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد (AOAC، ۱۹۹۰).

اندازه گیری میزان چروکیدگی

ابتدا حجم ظاهری اولیه نمونه ها قبل از سرخ کردن (V_0) و بعد از سرخ کردن (V_t)، با استفاده از رابطه ۲ تعیین شد:

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

در رابطه فوق، V حجم ظاهری (cm^3)، M وزن نمونه (gr)، M_1 وزن پیکنومتر خالی و حلال (gr)، M_2 وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (gr) و ρ دانسیته تولوئن (gr/cm^3) می باشد. در مرحله بعد با استفاده از رابطه ۳، میزان چروکیدگی در هر لحظه از زمان سرخ کردن تعیین شد (ضیایی فر و همکاران ۲۰۱۰):

$$S_{(t)} = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \quad (3)$$

در رابطه ۳، $S_{(t)}$ درصد چروکیدگی، V_0 حجم ظاهری نمونه خام (cm^3) و V_t حجم ظاهری نمونه پس از سرخ شدن (cm^3) می باشد.

اندازه گیری دانسیته ظاهری

دانسیته ظاهری از تقسیم وزن قطعات سیب زمینی بر حجم ظاهری آنها در هر لحظه از سرخ کردن به دست می آید (ضیایی فر و همکاران ۲۰۱۰):

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (4)$$

شده و از محصول خارج می‌گردد (فرانکو و همکاران ۲۰۰۷). همچنین، با گذشت زمان، رطوبت ماده غذایی به صورت نمایی کاهش یافته و به حالت تعادلی نزدیک شد (شکل ۱-ب). در لحظات اولیه سرخ‌کردن (۱۸۰ ثانیه اول) به دلیل بالا بودن محتوای رطوبت، آهنگ خروج رطوبت بیشتر بوده ولی با گذشت زمان سرخ‌کردن و با کاهش محتوای رطوبت ماده غذایی و همچنین تشکیل پوسته، رطوبت با سرعت کمتری از ماده غذایی خارج گردید (سوکومار و همکاران ۲۰۰۳). میزان رطوبت اولیه نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند به دلیل قرار-گیری این نمونه‌ها در حمام اولتراسوند و جذب رطوبت توسط قطعات سیب‌زمینی افزایش یافت. در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند به مدت ۳۰ دقیقه، سرعت خروج رطوبت بیشتر از نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده با اولتراسوند به مدت ۱۰ دقیقه بود. این امر می‌تواند به افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت نسبت داده شود. در مورد هر دو نوع پیش‌تیمار آبیگری اسمزی تحت غلظت‌های ۱ و ۳ درصد سدیم کلرید، به دلیل افزایش فشار اسمزی، رطوبت از داخل قطعات سیب-زمینی به محلول نمک وارد شده و محتوای رطوبت اولیه آن‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش یافت. محلول اسمزی ۳ درصد به دلیل دارا بودن فشار اسمزی بالا، محتوای رطوبت اولیه را حدود ۲۹ درصد کاهش داد اما نمونه‌های پیش‌تیمار شده با محلول ۱ درصد سدیم کلرید، محتوای رطوبت اولیه را ۱۳ درصد کاهش داد (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۱a؛ مای‌ترن و همکاران ۲۰۰۷). همچنین، اعمال پیش‌تیمار مایکروویو تحت توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه قبل از سرخ‌کردن، محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب‌زمینی را از ۵/۱۶ گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن به ۲/۵۵ گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن کاهش داد (۵۰ درصد) که این میزان کاهش در محتوای رطوبت از لحاظ آماری معنی-دار بود (جدول ۲). مسیت و همکاران (۲۰۰۷) و انگادی و

Deff به صورت تابعی از عکس دمای مطلق، یک رابطه خطی را نشان می‌دهد که از حاصل‌ضرب شیب این خط در ثابت جهانی گازهای کامل، انرژی فعال‌سازی به دست می‌آید.

مدلسازی تجربی دفع رطوبت به صورت تابعی از زمان، میزان روغن، دانسیته ظاهری و چروکیدگی

شش مدل تجربی برای تعیین نسبت رطوبتی نمونه‌ها در زمان‌های مختلف سرخ‌کردن و سه مدل دیگر نیز به صورت تابعی از میزان جذب روغن، چروکیدگی و دانسیته ظاهری محصول از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش بر اساس داشتن R^2 بالا و RMSE پایین توسط نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.06.635, R2012a) پیشنهاد شد. علاوه بر این، با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، ضرایب ثابت مدل‌ها به صورت تابعی از متغیرهای فرآیند (غلظت محلول اسمزی، زمان اولتراسوند، توان مایکروویو و دمای سرخ کردن) بر اساس میزان R^2 بالا به دست آمدند.

آنالیز آماری

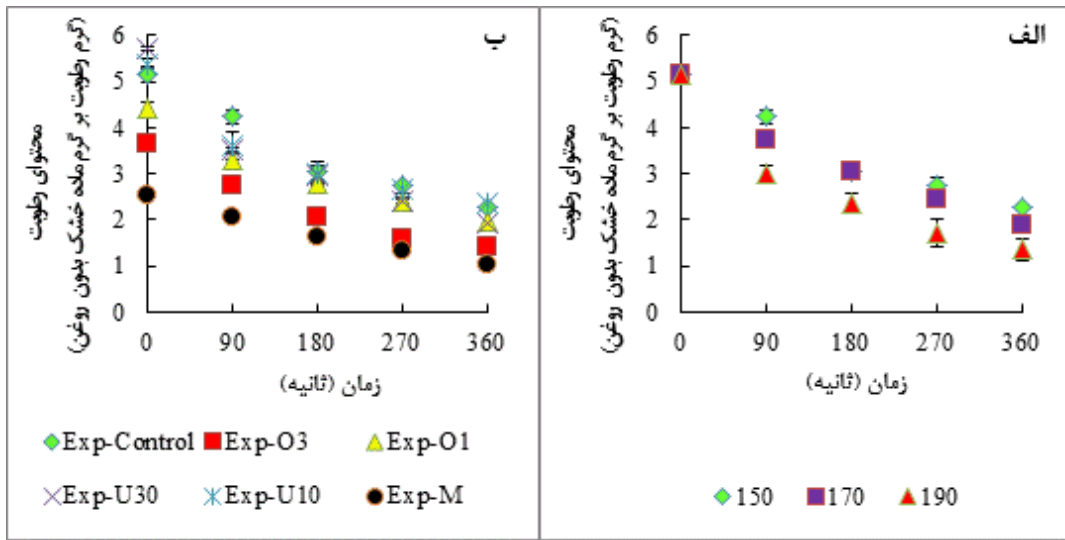
در این مطالعه، ۱۰ تیمار نشان داده شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار ($2 \times 4 \times 3 \times 10 = 240$) سرخ شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. همچنین، برای انجام مقایسه میانگین از آزمون بونفرونی در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) استفاده شد.

نتایج و بحث

تغییرات محتوای رطوبت

با افزایش دمای سرخ‌کردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی-گراد، خروج رطوبت از ماده غذایی بیشتر شده و محتوای رطوبت نمونه‌ها به حداقل مقدار ممکن کاهش یافت (شکل ۱-الف). در دماهای بالا، به دلیل بالا بودن سرعت انتقال حرارت، رطوبت ماده غذایی سریعاً تبخیر

همکاران (۲۰۰۹) در مطالعات خود به نتایج مشابهی دست یافته‌اند.



شکل ۱- تغییرات محتوای رطوبت قطعات سیب زمینی سرخ شده (نمونه شاهد) به صورت تابعی از زمان در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد (الف) و تأثیر پیش تیمارها بر محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب زمینی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (ب)

جدول ۲- محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب زمینی برای نمونه‌های شاهد و پیش تیمارهای مختلف

| تیمار | محتوای رطوبت اولیه (گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن) |
|---------|---|
| Control | ۵/۱۶ ^c |
| U10 | ۵/۳۹ ^{bc} |
| U30 | ۵/۷۱ ^{abc} |
| O1 | ۴/۴۴ ^d |
| O3 | ۳/۶۶ ^e |
| M | ۲/۵۵ ^f |
| O1U10M | ۱/۸۲ ^h |
| O1U30M | ۱/۸۳ ^{gh} |
| O3U10M | ۱/۳۱ ⁱ |
| O3U30M | ۱/۶۸ ^{hi} |

*حروف لاتین متفاوت در یک ستون، نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ % می‌باشد.

و نمونه‌های شاهد، دارای اختلاف معنی داری بود (جدول ۲).

تغییرات نسبت رطوبتی

شکل ۲- الف، تغییرات نسبت رطوبت حاصل از آزمایش و برازش شده با مدل ۳ جدول ۳ را در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده به صورت مجزا نشان می‌دهد. سرعت خروج رطوبت در

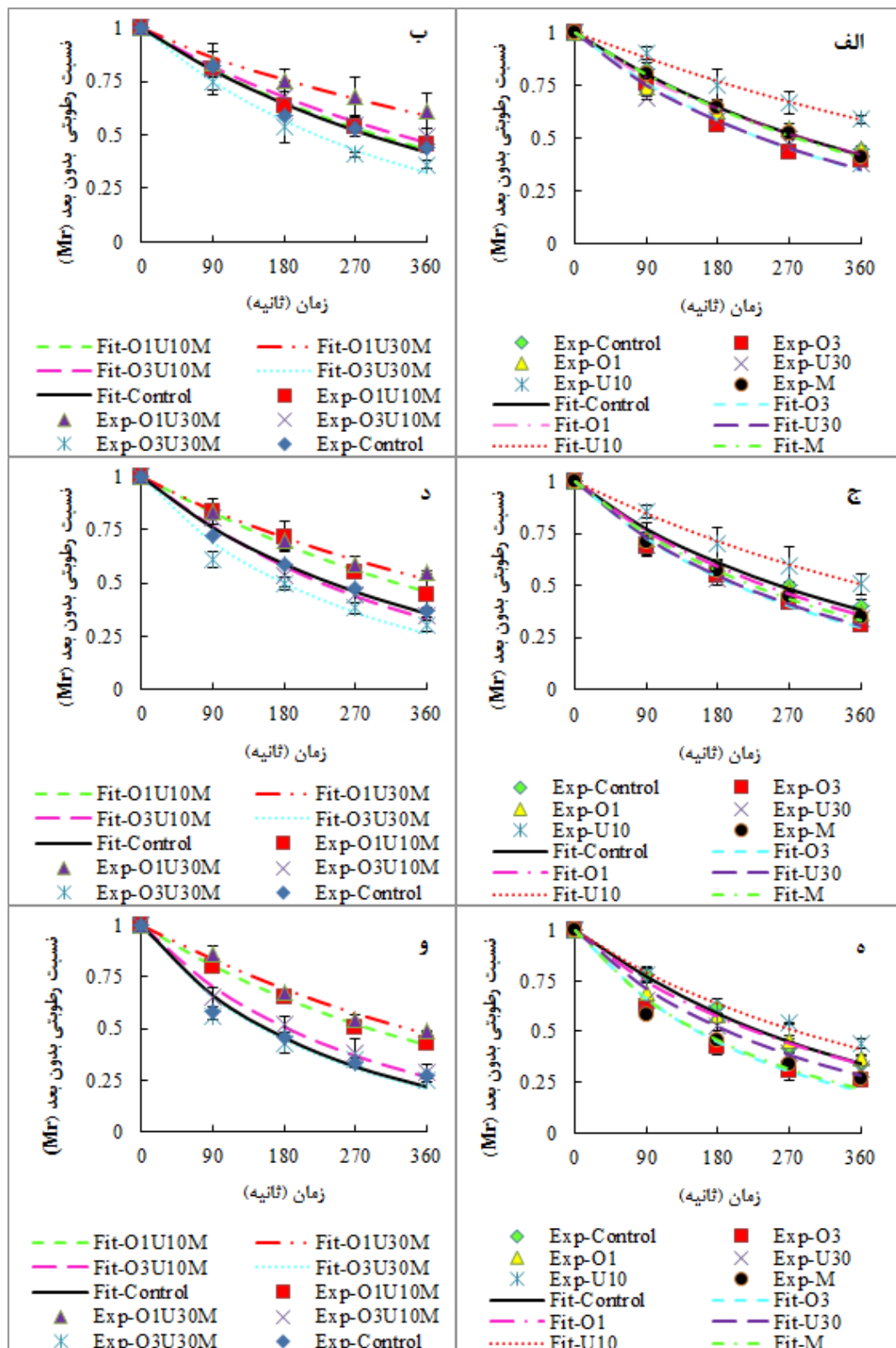
در ارتباط با تأثیر تلفیقی پیش تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبگیری اسمزی، هر ۴ نوع پیش تیمار O1U10M، O1U30M، O3U10M و O3U30M محتوای رطوبت اولیه را به ترتیب حدود ۶۴، ۶۲، ۷۴ و ۶۷ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش داد که از لحاظ آماری در مقایسه با نمونه‌های پیش تیمار شده به صورت مجزا

نمونه‌های پیش‌تیمار شده همواره بیشتر از نمونه‌های شاهد بود. نسبت رطوبتی در نمونه‌های پیش‌تیمار شده به وسیله مایکروویو و آبگیری شده با محلول نمک در مقایسه با نمونه‌های شاهد دارای کمترین میزان بودند. این میزان کاهش در نسبت رطوبتی در مقایسه با نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند و نمونه‌های شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. فرانکو و همکاران (۲۰۰۷) اثر آبگیری اسمزی با محلول نمک بر نسبت رطوبتی را مورد بررسی قرار داده‌اند؛ طبق نتایج به دست آمده از مطالعات این پژوهش‌گران، نسبت رطوبتی در یک زمان مشخص از سرخ‌کردن، در نمونه‌های پیش‌تیمار شده همواره بیشتر از نمونه‌های شاهد بود و این نتیجه با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت ندارد. دلیل این امر را می‌توان به شرایط مختلف فرآیند از جمله محتوای رطوبت اولیه محصول و همچنین میزان رطوبت خارج شده از آن در طی سرخ‌کردن نسبت داد. بر این اساس، هر چه قدر محتوای رطوبت اولیه و نیز رطوبت خارج شده از محصول طی سرخ‌کردن زیاد باشد، به همان اندازه نسبت رطوبتی محصول نیز کاهش خواهد یافت. همچنین، مطابق با شکل ۲-الف، در نمونه‌های پیش‌تیمار شده به وسیله اولتراسوند به مدت ۳۰ دقیقه به دلیل افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت از $3/35 \times 10^{-8}$ تا $2/18 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه شد. در نتیجه، نسبت رطوبتی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده با مایکروویو و محلول نمک، افزایش پیدا کرد؛ هر چند میزان این افزایش نیز از لحاظ آماری غیر معنی‌دار بود.

شکل ۲-ب، نیز تغییرات نسبت رطوبتی را برای تلفیقی از پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبگیری اسمزی با محلول نمک در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نسبت رطوبتی در نمونه‌های O1U10M، O1U30M و O3U10M (جدول ۱) بیشتر از نمونه‌های شاهد بود؛ اما اعمال پیش‌تیمار O3U30M، نسبت رطوبتی را نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش داد. احتمالاً دلیل این امر، اثر تلفیقی کاهش بیشتر محتوای رطوبت اولیه توسط پیش‌تیمار آبگیری اسمزی ۳ درصد و افزایش سرعت خروج رطوبت توسط پیش‌تیمار اولتراسوند به مدت ۳۰ دقیقه می‌باشد.

جدول ۳- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی نسبت رطوبتی وابسته به زمان (t) قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن

| شماره | مدل ریاضی | مرجع |
|-------|--|----------|
| ۱ | $M_t = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$ | کرنک |
| ۲ | $M = at^2 + bt + c$ | پیشنهادی |
| ۳ | $M = ab^t$ | پیشنهادی |
| ۴ | $M = \frac{1}{at + b}$ | پیشنهادی |
| ۵ | $M = \exp(-at)$ | پیشنهادی |
| ۶ | $M = \frac{t + a}{bt + a}$ | پیشنهادی |
| ۷ | $M = \frac{\exp(at)}{1 + bt}$ | پیشنهادی |



شکل ۲- تغییرات نسبت رطوبتی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۳ (جدول ۲)، طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵۰ (الف، ب)، ۱۷۰ (ج، د) و ۱۹۰°C (ه، و) در پیش تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

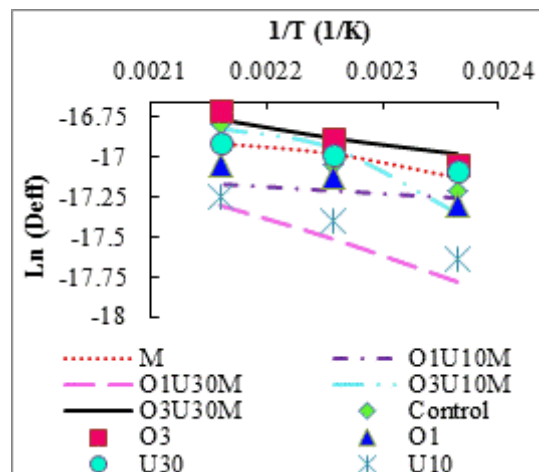
شکل ۲ (ج، د، و، ه)، تغییرات نسبت رطوبتی را برای نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده به صورت مجزا و تلفیقی در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. در این دماها نیز تغییرات نسبت رطوبتی مشابه نتایج حاصل در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود؛ با این تفاوت که افزایش دما، سرعت خروج رطوبت از قطعات سیب‌زمینی را تسریع کرد و نسبت رطوبتی را نسبت به دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داد ولی تأثیر دما بر کاهش نسبت رطوبتی معنی‌دار نبود.

ضریب انتشار مؤثر رطوبت و اثر دما بر آن
جدول ۴، مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت (D_{eff}) حاصل از تیمارهای مختلف را برای دماهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، با افزایش دمای سرخ‌کردن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت و خروج رطوبت از ماده غذایی سریع‌تر صورت گرفت (اکین‌بوده و همکاران ۲۰۰۹). کمترین میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت حدود $10^{-8} \times 1/90$ متر مربع بر ثانیه در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های پیش-تیمار شده تلفیقی O1U30M و بیشترین میزان آن، حدود $10^{-8} \times 5/54$ متر مربع بر ثانیه در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های پیش‌تیمار شده با محلول نمک ۳ درصد به دست آمد.

جدول ۴- ضریب انتشار مؤثر رطوبت (D_{eff}) و پارامترهای آماری حاصل از مدل کرنک برای تیمارها و دماهای مختلف

| تیمار | دما (°C) | | | | | |
|---------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|
| | ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | |
| | $D_{eff} \times 10^{-8}$ | R^2 | $D_{eff} \times 10^{-8}$ | R^2 | $D_{eff} \times 10^{-8}$ | R^2 |
| Control | ۴/۵۲ ^{ab} | ۰/۹۸۹۸ | ۳/۶۵ ^{abc} | ۰/۹۸۷ | ۳/۳۵ ^{ab} | ۰/۹۹۳۴ |
| O3 | ۵/۵۴ ^a | ۰/۹۹۸۹ | ۴/۶۶ ^a | ۰/۹۹۹ | ۳/۹۳ ^{ab} | ۰/۹۹۴۹ |
| O1 | ۳/۹۴ ^{abcd} | ۰/۹۸۹۹ | ۳/۹۴ ^{abc} | ۰/۹۹۶۹ | ۳/۰۶ ^{bc} | ۰/۹۹۲۵ |
| U30 | ۴/۵۲ ^{abcd} | ۰/۹۹۹۵ | ۴/۲۳ ^{ab} | ۰/۹۸۴ | ۳/۷۹ ^{ab} | ۰/۹۹۹۴ |
| U10 | ۳/۲۰ ^{cd} | ۰/۹۹۹۲ | ۲/۷۷ ^{bc} | ۰/۹۹۷۶ | ۲/۱۸ ^{cd} | ۰/۹۹۸۴ |
| M | ۵/۱۱ ^{abcd} | ۰/۹۹۸۷ | ۴/۲۳ ^{ab} | ۰/۹۹۷۹ | ۳/۶۴ ^{ab} | ۰/۹۹۰۵ |
| O1U10M | ۳/۵۰ ^{bcd} | ۰/۹۹۷۷ | ۳/۳۵ ^{abc} | ۰/۹۹۸۱ | ۳/۲۰ ^{bc} | ۰/۹۸۹ |
| O1U30M | ۳/۰۶ ^d | ۰/۹۹۱۵ | ۲/۴۸ ^c | ۰/۹۸۳۵ | ۱/۹ ^d | ۰/۹۹۹۴ |
| O3U10M | ۴/۹۶ ^{abc} | ۰/۹۷۷۹ | ۴/۳۷ ^a | ۰/۹۹۸۳ | ۲/۹۱ ^{bcd} | ۰/۹۹۹۲ |
| O3U30M | ۵/۲۵ ^a | ۰/۹۹۷۵ | ۴/۶۶ ^a | ۰/۹۹۶۲ | ۴/۲۳ ^a | ۰/۹۹۰۰ |

* حروف لاتین متفاوت در یک ستون، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد.



شکل ۳- منحنی تغییرات لگاریتم ضریب انتشار مؤثر رطوبت به صورت تابعی از عکس دما

جدول ۵- مقادیر انرژی فعال سازی طی سرخ کردن قطعات سیب زمینی برای تیمارهای مختلف

| تیمار | E_a | R^2 |
|---------|---------------------|-------|
| Control | ۱۲/۰ ^d | ۰/۹۷ |
| O3 | ۱۳/۸۹ ^c | ۰/۹۹ |
| O1 | ۱۰/۳۷ ^{bc} | ۰/۹۶ |
| U30 | ۷/۱۷ ^{ab} | ۰/۹۸ |
| U10 | ۱۵/۶۳ ^c | ۰/۹۸ |
| M | ۸/۷۹ ^b | ۰/۹۶ |
| O1U10M | ۳/۵۳ ^a | ۰/۹۹ |
| O1U30M | ۱۹/۵۳ ^d | ۰/۹۹ |
| O3U10M | ۲۱/۷۴ ^d | ۰/۹۲ |
| O3U30M | ۸/۷۷ ^{ab} | ۰/۹۹ |

مدل سازی دفع رطوبت به صورت تابعی از زمان، میزان روغن، دانسیته ظاهری و چروکیدگی شش مدل تجربی پیشنهاد شده برای تعیین نسبت رطوبتی نمونه‌ها به صورت تابعی از زمان سرخ کردن (جدول ۳) و سه مدل تجربی پیشنهاد شده دیگر نیز به صورت تابعی از میزان روغن، چروکیدگی و دانسیته ظاهری محصول (جدول ۶) داده‌های حاصل از آزمایش را به خوبی برازش نمودند (جدول ۷ و جدول ۸).

شکل ۳، منحنی تغییرات لگاریتم ضریب انتشار مؤثر رطوبت را به صورت تابعی از عکس دما طبق رابطه آرنیوس، برای تیمارهای مختلف (جدول ۱) نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش دمای سرخ کردن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت به صورت لگاریتمی افزایش پیدا کرد (ترانکاسو و پدرسچی ۲۰۰۹). با به دست آوردن شیب این نمودارها، بیشترین میزان انرژی فعال سازی حدود ۲۱/۷۴ و کمترین میزان آن حدود ۳/۵۳ ژول بر مول به ترتیب برای نمونه‌های O1U10M و O3U10M به دست آمد. جدول ۵، میزان انرژی فعال سازی تیمارهای مختلف (جدول ۱) را نشان می‌دهد.

جدول ۶- مدل‌های ریاضی نسبت رطوبتی به صورت تابعی از محتوای روغن (O)، دانسیته ظاهری (ρ) و چروکیدگی (S)

| شماره | مدل ریاضی | مرجع |
|-------|---------------------------|----------|
| ۱ | $M = aO^2 + b$ | پیشنهادی |
| ۲ | $M = a\rho^2 + b\rho + c$ | پیشنهادی |
| ۳ | $M = as^2 + bs + c$ | پیشنهادی |

جدول ۷- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۷-۲ جدول ۳ برای تیمارها و دماهای مختلف طی سرخ کردن

| مدل (۲) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۶۱۰ | ۰/۹۷۷۸ | ۰/۰۳۳۰ | ۰/۹۹۰۹ | ۰/۰۳۵۱ | ۰/۹۸۸۱ | Control |
| ۰/۰۲۷ | ۰/۹۹۶۰ | ۰/۰۳۸۶ | ۰/۹۸۹۶ | ۰/۰۰۷۵ | ۰/۹۹۹۵ | O3 |
| ۰/۰۴۰۴ | ۰/۹۸۶۵ | ۰/۰۲۹۳ | ۰/۹۹۲۱ | ۰/۰۳۲۲ | ۰/۹۸۸۶ | O1 |
| ۰/۰۴۴۷ | ۰/۹۸۶۱ | ۰/۰۲۹ | ۰/۹۹۳۸ | ۰/۰۴۴۹ | ۰/۹۸۲۵ | U30 |
| ۰/۰۲۹۱ | ۰/۹۹۱۴ | ۰/۰۰۹۰ | ۰/۹۹۹۰ | ۰/۰۲۱۲ | ۰/۹۹۲۱ | U10 |
| ۰/۰۲۷۳ | ۰/۹۹۴۹ | ۰/۰۳۰۸ | ۰/۹۹۲۷ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۹۹۹۷ | M |
| ۰/۰۱۰۸ | ۰/۹۹۸۹ | ۰/۰۱۵۹ | ۰/۹۹۷۴ | ۰/۰۱۰۷ | ۰/۹۹۸۸ | O1U10M |
| ۰/۰۲۷۷ | ۰/۹۹۱۷ | ۰/۰۰۹۲ | ۰/۹۹۸۸ | ۰/۰۱۹۲ | ۰/۹۹۱۹ | O1U30M |
| ۰/۰۴۵۶ | ۰/۹۸۶۶ | ۰/۰۴۰۰ | ۰/۹۸۹۱ | ۰/۰۱۵۸ | ۰/۹۹۷۰ | O3U10M |
| ۰/۰۷۳۹ | ۰/۹۶۸۲ | ۰/۰۵۹۹ | ۰/۹۷۵۹ | ۰/۰۰۹۹ | ۰/۹۹۹۳ | O3U30M |

| مدل (۳) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۶۱۳ | ۰/۹۶۶۳ | ۰/۰۲۸۳ | ۰/۹۸۹۹ | ۰/۰۳۶۳ | ۰/۹۸۱۰ | Control |
| ۰/۰۴۱۳ | ۰/۹۸۵۹ | ۰/۰۳۰۸ | ۰/۹۹۰۱ | ۰/۰۳۱۴ | ۰/۹۸۸۲ | O3 |
| ۰/۰۳۹۱ | ۰/۹۸۱۰ | ۰/۰۳۱۸ | ۰/۹۸۶۰ | ۰/۰۳۶۲ | ۰/۹۷۸۴ | O1 |
| ۰/۰۴۲۸ | ۰/۹۷۹۹ | ۰/۰۳۵۶ | ۰/۹۸۵۹ | ۰/۰۴۴۰ | ۰/۹۷۴۸ | U30 |
| ۰/۰۳۴۴ | ۰/۹۸۲۰ | ۰/۰۰۸۶ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۱۷۸ | ۰/۹۹۱۶ | U10 |
| ۰/۰۲۷۸ | ۰/۹۹۲۰ | ۰/۰۲۷۵ | ۰/۹۹۱۲ | ۰/۰۰۵۳ | ۰/۹۹۹۶ | M |
| ۰/۰۱۰۱ | ۰/۹۹۸۵ | ۰/۰۲۴۰ | ۰/۹۹۱۲ | ۰/۰۱۹۵ | ۰/۹۹۳۹ | O1U10M |
| ۰/۰۲۴۷ | ۰/۹۹۰۱ | ۰/۰۲۳۴ | ۰/۹۸۸۱ | ۰/۰۲۳۷ | ۰/۹۸۱۵ | O1U30M |
| ۰/۰۳۷۶ | ۰/۹۸۶۳ | ۰/۰۳۵۵ | ۰/۹۸۷۱ | ۰/۰۲۱۵ | ۰/۹۹۱۸ | O3U10M |
| ۰/۰۶۹۵ | ۰/۹۵۷۸ | ۰/۰۵۹۶ | ۰/۹۶۴۳ | ۰/۰۲۸۷ | ۰/۹۹۱۱ | O3U30M |

| مدل (۴) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۱۹۵ | ۰/۹۹۶۶ | ۰/۰۲۱۰ | ۰/۹۹۴۴ | ۰/۰۳۵۲ | ۰/۹۸۲۱ | Control |
| ۰/۰۲۰۵ | ۰/۹۹۶۵ | ۰/۰۲۶۸ | ۰/۹۹۲۵ | ۰/۰۲۴۶ | ۰/۹۹۲۸ | O3 |
| ۰/۰۱۹۸ | ۰/۹۹۵۱ | ۰/۰۱۲۱ | ۰/۹۹۸۰ | ۰/۰۱۵۷ | ۰/۹۹۵۹ | O1 |
| ۰/۰۱۹۸ | ۰/۹۹۵۹ | ۰/۰۰۹۲ | ۰/۹۹۹۱ | ۰/۰۲۲۳ | ۰/۹۹۳۵ | U30 |
| ۰/۰۲۱۵ | ۰/۹۹۲۹ | ۰/۰۲۳۰ | ۰/۹۸۹۹ | ۰/۰۲۴۳ | ۰/۹۸۴۴ | U10 |

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ۰/۰۶۱۲ | ۰/۹۶۱۴ | ۰/۰۲۰۵ | ۰/۹۹۵۱ | ۰/۰۳۵۰ | ۰/۹۸۳۲ | M |
| ۰/۰۳۰۱ | ۰/۹۸۷۱ | ۰/۰۴۷۸ | ۰/۹۶۵۰ | ۰/۱۵۳ | ۰/۹۹۶۳ | O1U10M |
| ۰/۰۳۷۳ | ۰/۹۷۷۴ | ۰/۰۱۳۷ | ۰/۹۹۵۹ | ۰/۰۱۴۲ | ۰/۹۹۳۳ | O1U30M |
| ۰/۰۲۸۲ | ۰/۹۹۲۳ | ۰/۰۵۷۲ | ۰/۹۶۶۵ | ۰/۰۱۸۵ | ۰/۹۹۳۹ | O3U10M |
| ۰/۰۲۲۹ | ۰/۹۹۵۴ | ۰/۰۲۳۳ | ۰/۹۹۴۵ | ۰/۰۳۲۲ | ۰/۹۸۸۸ | O3U30M |

| مدل (۵) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۵۷۸ | ۰/۹۶۰۱ | ۰/۰۲۷۶ | ۰/۹۸۷۲ | ۰/۰۳۱۵ | ۰/۹۸۰۹ | Control |
| ۰/۰۳۸۱ | ۰/۹۸۴۰ | ۰/۰۲۹۵ | ۰/۹۸۷۹ | ۰/۰۲۸۲ | ۰/۹۸۷۴ | O3 |
| ۰/۰۳۸۱ | ۰/۹۷۵۹ | ۰/۰۳۱۲ | ۰/۹۸۲۰ | ۰/۰۳۶۱ | ۰/۹۷۱۴ | O1 |
| ۰/۰۴۲۱ | ۰/۹۷۵۳ | ۰/۰۳۴۴ | ۰/۹۸۲۵ | ۰/۰۴۳۰ | ۰/۹۶۷۹ | U30 |
| ۰/۰۳۱۶ | ۰/۹۷۹۷ | ۰/۰۰۷۶ | ۰/۹۹۸۵ | ۰/۰۱۶۲ | ۰/۹۹۰۸ | U10 |
| ۰/۰۲۴۹ | ۰/۹۹۱۵ | ۰/۰۲۶۸ | ۰/۹۸۸۹ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۹۹۶ | M |
| ۰/۰۰۸۷ | ۰/۹۹۸۵ | ۰/۰۲۲۲ | ۰/۹۸۹۹ | ۰/۰۱۷۹ | ۰/۹۹۳۲ | O1U10M |
| ۰/۰۲۲۳ | ۰/۹۸۹۳ | ۰/۰۲۱۳ | ۰/۹۸۶۸ | ۰/۰۲۴۵ | ۰/۹۷۳۴ | O1U30M |
| ۰/۰۳۵۷ | ۰/۹۸۳۵ | ۰/۰۳۱۴ | ۰/۹۸۶۵ | ۰/۰۱۹۵ | ۰/۹۹۰۹ | O3U10M |
| ۰/۰۶۵۲ | ۰/۹۵۰۵ | ۰/۰۵۶۹ | ۰/۹۵۶۶ | ۰/۰۲۵۳ | ۰/۹۹۰۸ | O3U30M |

| مدل (۶) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۲۳۳ | ۰/۹۹۵۱ | ۰/۰۳۳۶ | ۰/۹۸۵۷ | ۰/۰۴۲۲ | ۰/۷۴۳ | Control |
| ۰/۰۳۵۲ | ۰/۹۸۹۷ | ۰/۰۳۹۳ | ۰/۹۸۳۹ | ۰/۰۳۵۷ | ۰/۹۸۴۸ | O3 |
| ۰/۰۲۹۳ | ۰/۹۸۹۳ | ۰/۰۲۴۴ | ۰/۹۹۱۷ | ۰/۰۲۰۶ | ۰/۹۹۳۰ | O1 |
| ۰/۰۲۹۷ | ۰/۹۹۰۸ | ۰/۰۲۵۷ | ۰/۹۹۲۶ | ۰/۰۲۵۲ | ۰/۹۹۱۶ | U30 |
| ۰/۰۲۷۲ | ۰/۹۸۸۷ | ۰/۰۳۳۲ | ۰/۹۷۹۰ | ۰/۰۳۲۱ | ۰/۹۷۲۸ | U10 |
| ۰/۰۷۳۵ | ۰/۹۴۴۵ | ۰/۰۳۴۵ | ۰/۹۸۶۲ | ۰/۰۴۷۴ | ۰/۹۶۹۱ | M |
| ۰/۰۴۱۹ | ۰/۹۷۵۱ | ۰/۰۵۸۳ | ۰/۹۴۸۰ | ۰/۰۲۵۹ | ۰/۹۸۹۳ | O1U10M |
| ۰/۰۴۷۰ | ۰/۹۶۴۲ | ۰/۰۱۸۴ | ۰/۹۹۲۶ | ۰/۰۱۲۴ | ۰/۹۹۴۹ | O1U30M |
| ۰/۰۴۰۰ | ۰/۹۸۴۵ | ۰/۰۶۹۲ | ۰/۹۵۰۹ | ۰/۰۲۶۷ | ۰/۹۸۷۳ | O3U10M |
| ۰/۰۲۲۵ | ۰/۹۹۵۶ | ۰/۰۲۳۶ | ۰/۹۹۴۴ | ۰/۰۴۵۳ | ۰/۹۷۷۹ | O3U30M |

| مدل (۷) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۱۹۳ | ۰/۹۹۶۷ | ۰/۰۱۷۰ | ۰/۹۹۶۳ | ۰/۰۳۲۴ | ۰/۹۸۴۸ | Control |
| ۰/۰۰۸۵ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۱۸۹ | ۰/۹۹۶۲ | ۰/۰۱۹۸ | ۰/۹۹۵۳ | O3 |
| ۰/۰۱۹۸ | ۰/۹۹۵۱ | ۰/۰۱۱۸ | ۰/۹۹۸۱ | ۰/۰۱۴۳ | ۰/۹۹۶۶ | O1 |
| ۰/۰۱۹۱ | ۰/۹۹۶۲ | ۰/۰۰۵۷ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۲۲۳ | ۰/۹۹۳۵ | U30 |
| ۰/۰۲۱۴ | ۰/۹۹۳۰ | ۰/۰۰۸۸ | ۰/۹۹۸۵ | ۰/۰۱۸۷ | ۰/۹۹۰۸ | U10 |
| ۰/۰۲۸۸ | ۰/۹۹۱۵ | ۰/۰۱۳۸ | ۰/۹۹۷۸ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۹۹۹۶ | M |
| ۰/۰۰۹۹ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۲۵۷ | ۰/۹۸۹۹ | ۰/۰۱۰۵ | ۰/۹۹۸۲ | O1U10M |
| ۰/۰۲۵۷ | ۰/۹۸۹۳ | ۰/۰۱۳۸ | ۰/۹۹۵۸ | ۰/۰۱۱۲ | ۰/۹۹۵۸ | O1U30M |

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| ۰/۰۲۲۳ | ۰/۹۹۵۲ | ۰/۰۳۶۳ | ۰/۹۸۶۵ | ۰/۰۱۵۷ | ۰/۹۹۵۶ | O3U10M |
| ۰/۰۲۱۳ | ۰/۹۹۶۰ | ۰/۰۲۲۳ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۰۲۱۵ | ۰/۹۹۵۰ | O3U30M |

جدول ۸- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۱-۳-۶ جدول برای تیمارها و دماهای مختلف

| مدل (۱) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۵۵۶ | ۰/۹۷۲۳ | ۰/۰۴۲۵ | ۰/۹۷۷۳ | ۰/۰۰۹۸ | ۰/۹۹۸۶ | Control |
| ۰/۰۱۸۳ | ۰/۹۹۷۲ | ۰/۰۷۵۶ | ۰/۹۴۰۳ | ۰/۰۹۶۳ | ۰/۸۸۹۶ | O3 |
| ۰/۰۱۰۰ | ۰/۹۹۸۷ | ۰/۰۲۲۳ | ۰/۹۹۳۱ | ۰/۰۴۳۴ | ۰/۹۶۸۹ | O1 |
| ۰/۰۳۷۲ | ۰/۹۸۵۵ | ۰/۰۳۲۱ | ۰/۹۸۸۶ | ۰/۰۴۹۱ | ۰/۹۶۸۶ | U30 |
| ۰/۰۵۸۳ | ۰/۹۴۸۳ | ۰/۰۶۱۹ | ۰/۹۲۷۲ | ۰/۰۲۶۰ | ۰/۹۸۲۱ | U10 |
| ۰/۰۸۲۴ | ۰/۹۳۰۲ | ۰/۰۳۱۳ | ۰/۹۸۸۶ | ۰/۰۵۹۶ | ۰/۹۵۱۳ | M |
| ۰/۰۴۶۳ | ۰/۹۶۹۵ | ۰/۰۳۴۶ | ۰/۹۸۱۷ | ۰/۰۲۰۴ | ۰/۹۹۳۳ | O1U10M |
| ۰/۰۴۲۵ | ۰/۹۷۰۷ | ۰/۰۱۶۰ | ۰/۹۹۴۴ | ۰/۰۲۳۵ | ۰/۹۸۱۶ | O1U30M |
| ۰/۰۱۴۰ | ۰/۹۹۸۱ | ۰/۰۵۴۵ | ۰/۹۶۹۵ | ۰/۰۳۷۷ | ۰/۹۷۴۷ | O3U10M |
| ۰/۰۳۷۰ | ۰/۹۸۸۰ | ۰/۰۷۲۰ | ۰/۹۴۷۹ | ۰/۰۲۱۱ | ۰/۹۹۵۲ | O3U30M |

| مدل (۲) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۴۳۶ | ۰/۹۸۸۶ | ۰/۰۸۲۵ | ۰/۹۴۲۹ | ۰/۰۴۳۴ | ۰/۹۸۱۹ | Control |
| ۰/۰۱۸۵ | ۰/۹۹۸۱ | ۰/۰۹۰۹ | ۰/۹۴۲۵ | ۰/۰۴۰۵ | ۰/۹۸۷۰ | O3 |
| ۰/۰۱۷۶ | ۰/۹۹۷۴ | ۰/۰۲۵۷ | ۰/۹۹۳۹ | ۰/۰۳۸۳ | ۰/۹۸۳۸ | O1 |
| ۰/۰۸۹۸ | ۰/۹۴۳۷ | ۰/۰۶۵۸ | ۰/۹۶۷۹ | ۰/۰۱۴۴ | ۰/۸۲۰۱ | U30 |
| ۰/۰۴۶۵ | ۰/۹۷۸۰ | ۰/۰۲۱۸ | ۰/۹۹۳۹ | ۰/۰۳۷۰ | ۰/۹۷۵۹ | U10 |
| ۰/۰۶۱۳ | ۰/۹۷۴۲ | ۰/۰۲۹۸ | ۰/۹۹۳۲ | ۰/۰۵۹۱ | ۰/۹۶۸۰ | M |
| ۰/۰۲۹۷ | ۰/۹۹۱۶ | ۰/۰۳۶۰ | ۰/۹۸۶۶ | ۰/۰۶۰۵ | ۰/۹۶۱۱ | O1U10M |
| ۰/۰۲۸۷ | ۰/۹۹۱۱ | ۰/۰۳۸۷ | ۰/۹۷۸۳ | ۰/۰۳۲۵ | ۰/۹۷۶۷ | O1U30M |
| ۰/۰۲۷۹ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۰۸۵۲ | ۰/۹۵۰۴ | ۰/۰۴۸۳ | ۰/۹۷۲۴ | O3U10M |
| ۰/۰۲۰۲ | ۰/۹۹۷۶ | ۰/۰۱۷۳ | ۰/۹۹۸۰ | ۰/۰۶۰۹ | ۰/۹۷۳۴ | O3U30M |

| مدل (۳) | | | | | | تیمار |
|----------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------------|
| دما (°C) | | | | | | |
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۳۴۵ | ۰/۹۹۲۹ | ۰/۰۴۷۸ | ۰/۹۸۰۸ | ۰/۰۵۸۱ | ۰/۹۶۷۵ | Control |
| ۰/۰۳۷۲ | ۰/۹۹۲۴ | ۰/۰۱۴۶ | ۰/۹۹۸۵ | ۰/۰۲۷۷ | ۰/۹۹۳۹ | O3 |
| ۰/۰۱۵۴ | ۰/۹۹۸۰ | ۰/۰۲۱۹ | ۰/۹۹۵۶ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۹۹۸۶ | O1 |
| ۰/۰۰۸۶ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۱۴۶ | ۰/۹۹۸۴ | ۰/۰۰۸۱ | ۰/۹۹۹۴ | U30 |
| ۰/۰۲۹۵ | ۰/۹۹۱۲ | ۰/۰۱۸۸ | ۰/۹۹۵۵ | ۰/۰۱۳۹ | ۰/۹۹۶۶ | U10 |
| ۰/۰۱۲۰ | ۰/۹۹۹۰ | ۰/۰۵۰۲ | ۰/۹۸۰۶ | ۰/۰۶۹۹ | ۰/۹۵۵۳ | M |
| ۰/۰۲۹۵ | ۰/۹۹۱۸ | ۰/۰۵۰۵ | ۰/۹۷۴۰ | ۰/۰۵۹۸ | ۰/۹۶۲۰ | O1U10M |
| ۰/۰۳۳۱ | ۰/۹۸۸۱ | ۰/۰۳۴۸ | ۰/۹۸۲۴ | ۰/۰۳۲۸ | ۰/۹۷۶۳ | O1U30M |
| ۰/۰۵۵۰ | ۰/۹۸۰۵ | ۰/۰۴۶۷ | ۰/۹۸۵۱ | ۰/۰۲۷۵ | ۰/۹۹۱۰ | O3U10M |

| | | | | | | |
|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| ۰/۰۲۰۳ | ۰/۹۹۷۶ | ۰/۰۰۰۵۴ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۳۴۹ | ۰/۹۹۱۲ | O3U30M |
|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|

جدول ۹- مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌های پیشنهادی*

| | |
|----------------------|--|
| R² | $M = at^2 + bt + c$ |
| ۰/۹۴۷۷ | $a = -۸/۸E-۷O - ۱/۸E-۷U + ۷/۸۸E-۹T + ۴/۸۵E - ۷O^x + ۷/۴۳E-۹U^x - ۳/۴ E - ۸M^x + ۷/۷E-۱۱T^x$ |
| ۰/۹۸۳۵ | $b = -۰/۰۰۰۵۹۵O + ۹/۱۴E-۵U - ۱/۷E-۵T - ۰/۰۰۰۲۹O^x - ۳/۸E-۶U^x - ۱/۰۴E-۵M^x - ۸/۷E-۹T^x$ |
| ۰/۹۹۹۸ | $a = ۰/۰۰۲۲۲۶O + ۰/۰۰۱۳۶۶U + ۰/۰۰۱۱۹۸۲T + ۰/۰۰۱۳۱O^x - ۴/۹E-۵U^x + ۰/۰۰۰۲۱۲ M^x - ۳/۷E-۵T^x$ |
| R² | $M = ab^t$ |
| ۰/۹۹۰۱ | $a = ۰/۰۰۱۳۳۷O + ۸/۵۸E-۵U + ۰/۰۰۵۵۴۹ M + ۰/۰۰۵۶۳۸T$ |
| ۰/۹۹۰۹ | $b = ۰/۰۰۴۸۶۲O + ۰/۰۰۰۵۱۵U + ۰/۰۰۲۰۲۸ M + ۰/۰۰۵۷۱۲T$ |
| R² | $M = \frac{1}{at + b}$ |
| ۰/۹۶۹۹ | $a = -۰/۰۰۱۵۳O - ۰/۰۰۰۱۹U + ۴/۸E-۶T + ۰/۰۰۰۷۷O^x + ۷/۰۵E-۶U^x - ۸/۹ E - ۶M^x + ۱/۲۹E-۷T^x$ |
| ۰/۹۹۹۸ | $b = ۰/۰۰۷۲۶۶O - ۰/۰۰۰۸۱U + ۰/۰۰۱۱۷۶۵T - ۰/۰۰۱۹۴O^x + ۳/۴۸E-۵U^x - ۰/۰۰۰۳۴ M^x - ۳/۵E-۵T^x$ |
| R² | $M = \exp(-at)$ |
| ۰/۹۷۵۴ | $a = -۰/۰۰۰۶۹O - ۹E-۵U + ۱/۲۵E-۵T + ۰/۰۰۰۳۱۴O^x + ۲/۸۷E-۶U^x - ۳/۳ E - ۶M^x + ۳/۰۷E-۸T^x$ |
| R² | $M = \frac{t + a}{bt + a}$ |
| ۰/۹۴۳۷ | $a = -۲۸۱/۷۱۱O + ۸۱/۹۵۷۶۴U + ۲۱/۷۰۶۵۶T + ۵/۶۳۳۸۷۸O^x - ۲/۸۰۸۲۶U^x + ۱۲/۳۳۰۷۱ M^x - ۰/۰۷۲۴۶T^x$ |
| ۰/۹۸۱۵ | $b = -۳/۳۴۹۳۳O - ۰/۱۱۲۱۸U + ۰/۰۳۶۳۰۴T + ۱/۲۹۶۰۹۵O^x + ۰/۰۰۲۸۶U^x + ۰/۰۳۸۵۷۹ M^x + ۹/۲E-۵T^x$ |
| R² | $M = \frac{\exp(at)}{1 + bt}$ |
| ۰/۷۳۶۵ | $a = ۰/۰۰۰۸۲۴O - ۵/۱E-۵U - ۵/۵E-۶T - ۰/۰۰۰۲۲O^x + ۲/۷۳E-۶U^x - ۴E-۵M^x + ۳/۹۱E-۹T^x$ |
| ۰/۸۱۵۴ | $b = -۰/۰۰۰۲۶O - ۰/۰۰۰۲۴U - ۳/۸E-۶T + ۰/۰۰۰۳۰۹O^x + ۹/۵۹E-۶U^x - ۶/۵ E - ۵M^x + ۱/۳۵E-۷T^x$ |
| R² | $M = aO^2 + b$ |
| ۰/۹۰۹۲ | $a = -۱۲/۸۶۶۱O - ۰/۲۰۶۱U - ۴/۷۵۷۳M - ۰/۱۳۲۸T$ |
| ۰/۹۹۲۷ | $b = -۰/۰۰۹۷O - ۰/۰۰۰۱U + ۰/۰۰۶۲M + ۰/۰۰۵۸T$ |
| R² | $M = a\rho^2 + b\rho + c$ |
| ۰/۹۴۴۳ | $a = -۲/۲۵۷۹O - ۰/۰۰۷۲U + ۰/۱۳۷۶T + ۰/۵۴۷۱O^x + ۰/۰۰۶۰U^x - ۰/۴۳۴۹ M^x - ۰/۰۰۰۵T^x$ |
| ۰/۹۳۴۴ | $b = ۳/۸۹۵۴O + ۰/۰۱۱۹U - ۰/۲۳۰۴T - ۰/۹۶۴۲O^x - ۰/۰۰۷۴U^x + ۰/۷۶۹۵ M^x + ۰/۰۰۰۹T^x$ |
| ۰/۹۲۰۸ | $c = ۱/۷۲۵۹O + ۰/۰۴۸۳U + ۰/۱۰۲۲T + ۰/۴۳۶۵O^x + ۰/۰۰۱۶U^x - ۰/۳۱۸۹ M^x + ۰/۰۰۰۴T^x$ |
| R² | $M = as^2 + bs + c$ |
| ۰/۸۶۹۷ | $a = ۰/۳۲۱۹O + ۰/۲۵۵۵U + ۰/۳۴۹۱M - ۰/۸۱۵T$ |
| ۰/۷۳۴۶ | $b = -۰/۱۱۰۸O + ۰/۰۱۴۳U + ۰/۱۶۰M - ۰/۰۰۴۶T$ |
| ۰/۹۹۱۰ | $c = ۰/۰۰۶۴O + ۰/۰۰۰۵U + ۰/۰۰۰۶M + ۰/۰۰۵۷T$ |

* در روابط فوق، O غلظت محلول اسمزی، U زمان اولتراسوند، M توان مایکروویو و T دمای سرخ کردن می‌باشد.

چروکیدگی و دانسیته ظاهری مناسب کمک شایانی می‌کنند. ضرایب ثابت مدل‌های نسبت رطوبتی به دست

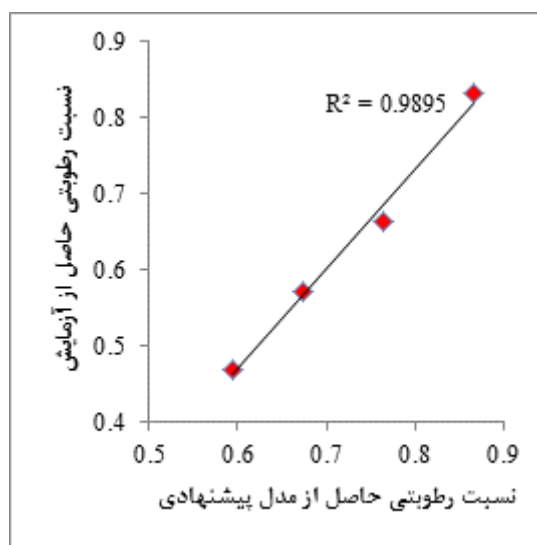
هر کدام از این مدل‌ها در پیش بینی نسبت رطوبتی نمونه‌ها برای تولید محصولی با میزان روغن،

معتبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی

قطعات سیب‌زمینی ابتدا در داخل حمام اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و زمان ۲۰ دقیقه پیش‌تیمار شده و بعد در محلول نمک ۲ درصد به مدت ۳ ساعت قرار گرفته و در نهایت با استفاده از مایکروویو با توان ۵ وات بر گرم به مدت ۵ دقیقه خشک شدند. سپس، نمونه‌ها در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ شدند. نتایج حاصل از برازش مقادیر نسبت رطوبتی آزمایشی با مقادیر نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی (جدول ۳)، در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل، انطباق خوبی بین مقادیر حاصل از مدل و مقادیر حاصل از آزمایش وجود دارد ($R^2=0/9895$).

آمده با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره به صورت تابعی از غلظت محلول اسمزی، زمان اولتراسوند، توان مایکروویو و دمای سرخ کردن در جدول ۹ نشان داده شده است.

در حالت کلی، تلفیق پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و آبیگری اسمزی، میزان جذب روغن را در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده کاهش داد. علاوه بر این، اعمال پیش‌تیمارهای مایکروویو، آبیگری اسمزی و تلفیق این پیش‌تیمارها با اولتراسوند، دانسیته ظاهری نمونه‌ها را کاهش و چروکیدگی آنها را افزایش داد. این تغییرات را می‌توان به کاهش میزان رطوبت نمونه‌ها طی فرآیند سرخ‌کردن نسبت داد (انگادی و همکاران ۲۰۰۹؛ ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۱۰).



شکل ۴- برازش داده‌های نسبت رطوبتی حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل پیشنهادی (مدل ۳، جدول ۳)

نتیجه‌گیری

اعمال پیش‌تیمارهای مایکروویو و آبیگری اسمزی و همچنین تلفیق پیش‌تیمارهای مذکور با اولتراسوند، محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب‌زمینی را کاهش داد. همچنین، اعمال پیش‌تیمار اولتراسوند تحت فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در دو زمان ۱۰ و ۳۰ دقیقه منجر به افزایش محتوای رطوبت اولیه قطعات سیب‌زمینی گردید. در

بررسی اثر دما بر محتوای رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی سرخ‌کردن، افزایش دما از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، خروج رطوبت از سیب‌زمینی را تسریع کرد. در بخش مدل‌سازی این پژوهش، نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که مدل کرنک و مدل‌های پیشنهادی، قادر به برازش داده‌های آزمایشی با ضریب همبستگی بالا هستند. با استفاده از این مدل‌ها و بدون انجام

آزمایش‌های متعدد، می‌توان میزان رطوبت ماده غذایی را در تمامی زمان‌های سرخ کردن به دست آورده و هزینه‌های حاصل از آزمایش‌های تکراری را کاهش داد.

منابع مورد استفاده

- بیکی ح، همدی ن، ۱۳۹۵، تأثیر آنزیم‌بری، پیش‌خشک‌کردن و شرایط سرخ کردن بر روی خصوصیات کیفی خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۶، ۱۸۷-۱۷۷.
- خضری پورعرب م، حجتی م، سمواتی و، ۱۳۹۴، تأثیر پوشش‌های صمغ عربی و پلی‌ساکارید محلول در آب سویا بر جذب روغن و بافت خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده با استفاده از روش سطح پاسخ، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۵، ۶۳۸-۶۲۳.
- رونقی ط، دهقان‌نیا ج، قنبرزاده ب، ۱۳۹۵، مدل‌سازی تجربی جذب روغن و بررسی تأثیر امواج فراصوت و پوشش خوراکی طی سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۶، ۲۴۵-۲۲۱.
- نقوی ع، دهقان‌نیا ج، قنبرزاده ب، رضایی‌مکرم ر، ۱۳۹۲، مدل‌سازی تجربی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با اولتراسوند و خشک‌کردن طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۸، ۱۱۱-۹۹.
- Akinbode A, Adedeji M, Ngadi O and Raghavan GSV, 2009. Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering* 91:146-153.
- AOAC, 1990. *Official Methods of Analysis* (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- AOAC, 1995. *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- Chen Y and Moreira RG, 1997. Modelling of a batch deep-fat frying process for tortilla chips. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 75:181-190.
- Clark DE, Folz DC and West JKA, 2000. Processing material with microwave energy. *Journal of Material Science and Engineering* 287:153-158.
- Fernandes AN, Linhares FE and Rodrigues S, 2008. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Journal of Ultrasonics Sonochemistry* 15:1049-1054.
- Franco P, Pedro M, Natalie S and Romina P, 2007. Physical properties of pre-treated potato chips. *Journal of Food Engineering* 79:1474-1482.
- Krokida MK, Karathanos VT and Maroulis ZB, 1998. Effect of osmotic dehydration on color and sorption characteristics of dehydrated fruits *Drying Technology*.
- Krokida MK, Oreopoulou V and Maroulis ZB, 2001a. Effects of osmotic dehydration pretreatment on quality of french fries. *Journal of Food Engineering* 49:339-345.
- Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB and Marinou-Kouris D, 2001b. Effect of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering* 49(4):347-354.
- Lulai EC and Orr PH, 1997. Influence of potato specific gravity on yield and oil content of chips. *American Potato Journal* 56:379-390.
- Mai Tran TT, Xiao DC and Christopher S, 2007. Reducing oil content of fried potato crisps considerably using a 'sweet' pre-treatment technique. *Journal of Food Engineering* 80:719-726.
- Mecit HO, Serpil S and Gulum S, 2007. Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. *Journal of Food Engineering* 79:83-91.
- Mellema M, 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Journal of Food Science and Technology* 14(9):364-373.
- Mittal GS and Zhang J, 2000. Use of artificial neural network to predict temperature, moisture, and fat in slab-shaped foods with edible coatings during deep-fat frying. *Journal of Food Science* 65:978-983.
- Ngadi MO, Wang Y, Adedeji AA and Raghavan GSV, 2009. Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *LWT - Food Science and Technology* 42: 438-440.

- Ni H and Datta AK, 1999. Moisture, oil and energy transport during deep-fat frying of food materials. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Part C: Food and Bioproducts Processing* 77:194-204.
- Rahimi J and Ngadi MO, 2014. Inter-particle space fractions in fried batter coatings as influenced by batter formulation and pre-drying time. *LWT – Food Science and Technology* 57:486–493.
- Sukumar D, Bhatb KK and Rastogi NK, 2003. Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food, *LWT - Food Science and Technology* 36:91-98.
- 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.
- Ziaifar 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): 191-2010.

Coupled effect of ultrasound, microwave and osmotic dehydration pretreatments on water loss kinetics during deep-fat frying of potatoes

M Barmour¹, J Dehghannya^{2*} and B Ghanbarzadeh²

Received: October 03, 2016

Accepted: February 9, 2017

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

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

*Corresponding author: E-mail: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

Abstract

The purpose of this study was to model water loss during deep-fat frying of potato slices pretreated with ultrasound (frequency of 40 kHz for 10 and 30 min), microwave (power of 5 W/g for 5 min) and osmotic dehydration (sodium chloride solution at concentrations of 1 and 3% and temperature of 40°C for 3 hours). Diffusion Fick's law was used to model water loss during the frying process. Ultrasound pretreatment for 10 min decreased the effective moisture diffusion coefficient and water loss rate from the potatoes. Moreover, a number of experimental models were used to model water loss during the process. Also, using the Arrhenius equation, effect of temperature on the effective moisture diffusion coefficient was investigated. With increasing frying temperature, effective moisture diffusion coefficient increased logarithmically. On the other hand, using multivariate regression analysis, the water loss model constants as a function of various process conditions (concentration of osmotic solution, ultrasound time, microwave power and frying temperature) were obtained. In general, application of microwave and osmotic dehydration pretreatments as well as the combination of these pretreatments with ultrasound decreased the initial moisture content of the potato strips.

Keywords: Water loss, Ultrasound, Osmotic dehydration, Microwave, Modeling