

مدل‌سازی سینتیک افت رطوبت قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با اولتراسوند و مایکروویو در طی فرایند سرخ کردن عمیق

جلال دهقان‌نیا^{۱*}، حامد باقری درویش‌محمد^۲، بابک قنبرزاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۰۲

چکیده

مدل‌سازی فرایند سرخ کردن در جهت آگاهی از روابط بین متغیرهای مختلف، می‌تواند گامی مناسب در جهت بهبود کیفیت محصول باشد. در این پژوهش، اثر پیش‌تیمارش اولتراسوند تحت فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه و پیش‌تیمارش مایکروویو با توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم به مدت ۱۰ دقیقه بر میزان رطوبت سیب‌زمینی سرخ‌شده در درجه حرارت‌های ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. برازش داده‌های تجربی افت رطوبت نمونه‌ها در طی فرایند سرخ کردن با استفاده از شش مدل تجربی پیشنهادی و قانون فیک انجام شد. نتایج نشان داد که هر دو پیش‌تیمارش اولتراسوند و مایکروویو در کلیه سطوح مورد استفاده، میزان رطوبت نهایی نمونه‌ها را به طور معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد کاهش دادند. همچنین، با افزایش دما، میزان رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی به شکل غیرمعنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد کاهش یافت. از طرف دیگر، با افزایش زمان فرایند، میزان رطوبت نمونه‌ها به طور معنی‌دار و بصورت نمایی کاهش پیدا کرد. همچنین، مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش، با داشتن ضریب تبیین بالا (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) پایین، به خوبی داده‌های تجربی را برازش نمودند. ضریب انتشار مؤثر رطوبت برای نمونه‌های مختلف در دامنه $3/57 \times 10^{-8}$ الی $11/08 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه به دست آمد. اعمال پیش‌تیمارش اولتراسوند و مایکروویو موجب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و کاهش انرژی فعال‌سازی مدل‌سازی نمونه‌ها شدند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی سینتیک، میزان رطوبت، قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده، اولتراسوند، مایکروویو

مقدمه

های سرخ‌شده است (Moreira et al., 1999). در فرایند سرخ کردن، دفع رطوبت ماده غذایی توسط مکانیسم‌های انتشار مولکولی^۴، جریان موینگی^۵ و جریان فشاری^۶ صورت می‌گیرد. نیروی محرکه دفع رطوبت، اختلاف فشار ایجادشده بین سطح و درون ماده غذایی در نتیجه تبدیل آب به بخار می‌باشد. در طی فرایند سرخ کردن، دفع رطوبت ماده غذایی با جوشش سطحی آغاز و با کاهش محتوای رطوبت سطحی و آغاز تشکیل پوسته، انتقال رطوبت از مرکز به سطح ماده غذایی به طریق انتشار صورت می‌پذیرد (Singh, 1995). سرعت افت رطوبت ماده غذایی طی فرایند سرخ کردن با گذشت زمان بصورت نمایی کاهش می‌یابد و استفاده از درجه حرارت‌های بالا موجب افزایش سرعت دفع رطوبت می‌شود (Bravo et al., 2009). درک صحیح از پارامترهای سینتیکی حاصل از مدل‌سازی فرایند، امکان پیش‌بینی تغییرات کیفی محصول نهایی و بهبود شرایط فرایند را مهیا می‌سازد (Yildiz et al., 2007). مدل‌هایی در سطوح

سرخ کردن عمیق، فرایند پخت ماده غذایی از طریق غوطه‌وری آن در روغن‌های خوراکی در دمای بالاتر از نقطه جوش آب (۲۰۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد (Yildiz et al., 2007). طی این عملیات واحد پیچیده، انتقال جرم و حرارت به صورت همزمان رخ می‌دهد. طی فرایند سرخ کردن، حرارت از روغن به سطح ماده غذایی و سپس به درون آن منتقل می‌شود و همزمان رطوبت از داخل ماده غذایی به خارج آن انتقال می‌یابد. در نتیجه پدیده‌های مذکور و با ادامه فرایند، افزایش دما و کاهش رطوبت در ماده غذایی توسعه پیدا کرده و این امر باعث ایجاد ویژگی‌های مطلوب از قبیل رنگ، بافت و طعم در محصول می‌گردد (Yildiz et al., 2007). میزان رطوبت یکی از ویژگی‌های مهم و مؤثر در کیفیت فراورده-

۱، ۲ و ۳- دانشیار، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی،

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* - نویسنده مسئول: (Email: jdehghannya@yahoo.com)

4 Molecular diffusion
5 Capillary flow
6 Pressure driven flow

مختلف پیچیدگی برای توصیف پدیده دفع رطوبت در فرایند سرخ- کردن گزارش شده است. به عنوان مثال، Krokida و همکاران (۲۰۰۰) و Gupta و همکاران (۲۰۰۰)، مدل سینتیکی درجه اولی که در آن سرعت افت رطوبت با میزان رطوبت متناسب است را ارائه نموده‌اند. Farkas و همکاران (۱۹۹۶) نیز در مدلی پیچیده‌تر، محصول را متشکل از دو ناحیه پوسته و ناحیه مرکزی که توسط مرز متحرک از هم جدا شده‌اند، در نظر گرفته‌اند. محققان مختلفی از قانون دوم فیک برای مدل‌سازی پدیده انتقال جرم در فرایند سرخ- کردن استفاده کرده‌اند. این قانون تصویر ساده‌ای از افت رطوبت را طی فرایند سرخ کردن ارائه می‌دهد که با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارد (Moyano & Berna 2002; Pedreschi *et al.*, 2007). این مدل، انتشار رطوبت در ماده غذایی را به‌وسیله ضریب انتشار مؤثر رطوبت^۱ (D_{eff}) بیان می‌کند. این ضریب یک فاکتور انتقال کلی است و تمامی مکانیسم‌های شرکت‌کننده در انتقال رطوبت را در بر می‌گیرد (Troncoso & Pedreschi, 2009).

Ngadi و همکاران (۲۰۰۹)، اثر پیش تیمار مایکروویو بر افت رطوبت قطعات ناگت مرغ را در فرایند سرخ کردن مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، نمونه‌ها به مدت ۱ و ۲ دقیقه با توان ۱۴/۱ وات بر گرم تحت امواج مایکروویو قرار گرفته و سپس در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد سرخ شدند. نتایج نشان داد که افزایش زمان پیش تیمار به طور معنی‌داری رطوبت محصول را در محصول نهایی کاهش داد. Adedeji و همکاران (۲۰۰۹) نیز اثر پیش تیمار مایکروویو با سه توان مختلف را بر میزان افت رطوبت قطعات ناگت مرغ بررسی کردند. در این مطالعه، نمونه‌ها پس از اعمال پیش تیمار در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد سرخ شدند. طبق نتایج حاصل، مقدار رطوبت اولیه نمونه‌ها بعد از اعمال پیش تیمار به طور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین، با افزایش توان پیش تیمار مایکروویو مقدار رطوبت اولیه نمونه‌ها به میزان بیشتری کاهش پیدا کرد. همچنین، Song و همکاران (۲۰۰۷)، اثر پیش تیمار مایکروویو تحت خلأ روی افت رطوبت قطعات چیپس سیب‌زمینی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، نمونه‌ها در آب گرم با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد آنزیم‌بری شدند. پیش تیمار خشک- کردن با مایکروویو به مدت ۵ و ۱۰ دقیقه تحت توان ۱۴۶/۵ وات و خلا ۰/۰۶- مگاپاسکال انجام شد. سپس، قطعات سیب‌زمینی تحت خلا ۰/۰۹- مگاپاسکال در دماهای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه سرخ شدند. طبق نتایج حاصل در این پژوهش، پیش تیمار مایکروویو به طور معنی‌داری مقدار رطوبت قطعات چیپس را کاهش داد. همچنین، با افزایش زمان اعمال پیش تیمار، مقدار رطوبت محصول به طور معنی‌داری کاهش یافت.

پیش تیمار دیگری که اخیراً در فرایندهای انتقال جرم مورد

استفاده قرار گرفته است، امواج اولتراسوند^۲ با فرکانس بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد (Fernandes *et al.*, 2008). امروزه از این امواج به عنوان پیش تیمار در خشک کردن مواد غذایی استفاده می‌شود (Fernandes *et al.*, 2008). این پیش تیمار با غوطه‌ور کردن مواد غذایی در آب یا محلول‌های آبی و اعمال امواج اولتراسوند روی آن‌ها، باعث افزایش ضریب انتقال جرم (تسریع در انتشار رطوبت) می‌گردد. امواج اولتراسوند باعث انقباض و انبساط‌های متوالی و تشکیل حباب-هایی (کاویتاسیون^۳) در ماده غذایی می‌شود و ترکیدن این حباب‌ها، انتشار رطوبت را تسهیل می‌بخشد. دلیل دیگری که سبب تسریع انتشار رطوبت در نتیجه به کاربرد امواج اولتراسوند می‌شود، تشکیل کانال‌های میکروسکوپی در بافت ماده غذایی می‌باشد (Fernandes *et al.*, 2008).

بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون در ارتباط با تأثیر همزمان امواج اولتراسوند و مایکروویو بر میزان کاهش رطوبت ماده غذایی طی فرایند سرخ کردن عمیق، پژوهشی صورت نگرفته است و این پژوهش با هدف بررسی تأثیر امواج فوق بر افت رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ کردن و همچنین مدل‌سازی روند آن انجام شد.

مواد و روش‌ها

مواد

سیب‌زمینی‌های مورد استفاده (رقم آگریا)، از بازار محلی تهیه و قبل از سرخ شدن در سردخانه بالای صفر درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. روغن مایع مخصوص سرخ کردنی که مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه (با مارک تجاری بهار تهیه شده در شرکت صنعتی بهشهر) بود، برای سرخ کردن برش‌های سیب‌زمینی به کار برده شد.

تجهیزات

در این پژوهش، از سرخ‌کن Moulinex (مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، دارای سنسور دمایی (ترموستات) توکار^۴ برای کنترل ترموستاتیکی دما (Carreri *et al.*, 2010) با دقت $\pm 3^{\circ}\text{C}$)، دستگاه مایکروویو (سامسونگ مدل CS4550، ساخت کره) و دستگاه حمام اولتراسوند (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و همچنین زمان صوت‌دهی) استفاده شد.

2 Ultrasound

3 Cavitation

4 Built-in temperature sensor

1 Effective moisture diffusion coefficient

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

| ردیف | تیمار | علامت اختصاری |
|------|---|---------------|
| ۱ | شاهد | Control |
| ۲ | مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم | M3 |
| ۳ | مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم | M6 |
| ۴ | اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز | U28 |
| ۵ | اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز | U40 |
| ۶ | اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم | U28-M3 |
| ۷ | اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم | U40-M3 |
| ۸ | اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم | U28-M6 |
| ۹ | اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم | U40-M6 |

۱: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دما و زمان مورد نظر سرخ شدند.

۲ و ۳: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار مایکروویو، در دستگاه مایکروویو تحت توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم به مدت ۱۰ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار اولتراسوند، در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۱۵ دقیقه، به طور مجزا قرار داده شدند.

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش‌تیمارهای اولتراسوند و خشک‌کردن، ابتدا در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۱۵ دقیقه، به طور مجزا قرار گرفتند و سپس در دستگاه مایکروویو، تحت توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم به مدت ۱۰ دقیقه، به طور مجزا قرار گرفتند.

آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا سیب‌زمینی‌ها شسته شده و پوست‌گیری شدند. سپس، برش‌های سیب‌زمینی با ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2$ cm (ارتفاع، عرض و طول)، به وسیله یک کاتر دستی تهیه شده و پس از جداکردن نشاسته سطحی به وسیله شستشو با آب مقطر، آب سطحی اضافی توسط کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. قطعات سیب‌زمینی تا زمان انجام پیش‌تیمارها و سرخ‌کردن، در پلیت‌های در بسته جهت جلوگیری از افت رطوبت نگهداری شدند. نمونه‌های مختلف با توجه به نوع پیش‌تیمار به گروه‌های جداگانه‌ای تقسیم‌بندی گردیدند (جدول ۱).

شرایط سرخ‌کردن

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی مطابق جدول ۱، در سرخ‌کن با دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه سرخ شدند. ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شده و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن موردنظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به طوری که با رسیدن دمای روغن به دمای مورد نظر، ۱۲۰-۱۰۰ گرم نمونه در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شد و سپس سبد حاوی نمونه‌ها به طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ‌شدن نمونه‌ها به مدت زمان موردنظر، آن‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شدند. سپس، روغن سطحی نمونه‌ها با کاغذ جذب گرفته شده و جهت انجام آزمایش‌های مربوط آماده گردیدند. روغن سرخ‌کن هر ۸ ساعت یک‌بار (بعد از هر ۸ بار سرخ‌کردن) جهت جلوگیری از اثر تغییرات ویژگی‌های روغن بر جذب روغن تعویض می‌شد. تمامی آزمایش‌ها با ۲ تکرار انجام شد و داده‌های گزارش شده،

میانگین داده‌های تجربی هستند.

اندازه‌گیری میزان رطوبت

میزان رطوبت نمونه‌ها، از طریق خشک‌کردن آن‌ها در آون در دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد و در نهایت بر حسب گرم آب بر گرم ماده جامد خشک گزارش گردید (AOAC, 1984).

مدل‌سازی افت رطوبت و محاسبه ضریب انتشار مؤثر رطوبت

در این پژوهش، ضریب انتشار مؤثر رطوبت بر اساس قانون انتشار فیک محاسبه شد (Crank, 1975):

$$MR = \frac{M_t - M_c}{M_0 - M_c} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (1)$$

MR: میزان رطوبت بدون بعد

M_t : مقدار رطوبت در لحظه t ام (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک)

M_0 : میزان رطوبت اولیه (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک)

M_c : میزان رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک)

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

L: نصف ضخامت تیغه (m)

t: زمان سرخ‌کردن (s)

علاوه بر این، مدل‌سازی ریاضی خروج رطوبت در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، به صورت تابعی از زمان (t) با استفاده از مدل‌های پیشنهادی نیز صورت گرفت. مدل-

های پیشنهادی از طریق برازش با داده‌های حاصل از آزمایش توسط نرم‌افزار MATLAB R2011a (Version 7.12.635) به دست آمدند. ارزیابی مدل‌ها نیز با استفاده از دو معیار ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد؛ به این صورت که مدل‌های دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تر به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

محاسبه انرژی فعال‌سازی

برای محاسبه اثر دما روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت، از معادله آرنیوس استفاده شد (Troncoso & Pedreschi, 2009):

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

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

D_0 : ضریب پیش‌نمایی (m^2/s)

E_a : انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)

R : ثابت جهانی گازهای کامل (۸/۳۱۴۴۱ kJ/mol 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 گازهای کامل، انرژی فعال‌سازی به دست می‌آید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش، یک آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تأثیر دمای سرخ‌کردن در سه سطح (۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان سرخ‌کردن در چهار سطح (۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه)، پیش‌ تیمار اولتراسوند در سه سطح فرکانس (۰، ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز) و پیش‌ تیمار مایکروویو در سه سطح توان (۰، ۳ و ۶ وات بر گرم) روی افت رطوبت قطعات سیب-زمینی طی فرایند سرخ‌کردن آنالیز شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون بونفرونی^۱ در سطح احتمال ۵٪ انجام شد.

نتایج و بحث

جدول ۲، نتایج مقایسه میانگین میزان رطوبت نمونه‌های سیب-زمینی سرخ‌شده در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۲، با افزایش دمای فرایند سرخ‌کردن، میزان رطوبت نمونه‌ها کاهش یافت؛ هر چند کاهش میزان رطوبت نمونه‌ها با افزایش دما در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود. این نتیجه با نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های دیگر مطابقت دارد (Adedeji *et al.*, 2009; Troncoso & Pedreschi, 2009). اثر

مثبت دمای روغن روی کاهش میزان رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ‌کردن ثابت شده است (Krokida *et al.*, 2001) و دلیل آن بالا بودن انرژی سینتیکی مولکول‌های آب در دماهای بالاتر است که این امر به افت سریع رطوبت، در این دماها، منجر می‌شود (شکل ۱-الف). دفع رطوبت از طریق انتشار ملکول‌های آب و جذب روغن در حین فرایند سرخ‌کردن، باعث تشکیل شکاف‌هایی در ساختار جامد ماده غذایی شده و این امر آسیب‌های ساختاری و تغییرات قابل ملاحظه‌ای را از نقطه‌نظر ویژگی‌های ساختاری از جمله تخلخل به وجود می‌آورد (Krokida *et al.*, 2001). کاهش رطوبت مواد غذایی طی فرایند سرخ‌کردن را باید به صورت تابعی از زمان فرایند در نظر گرفت (Soorgi *et al.*, 2010). طی فرایند سرخ‌کردن، میزان رطوبت نمونه‌ها با گذشت زمان به طور معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد کاهش یافت (جدول ۲). شکل ۱-ب، میزان رطوبت نمونه‌های مختلف سرخ‌شده در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد را تا رسیدن به رطوبت تعادلی نشان می‌دهد. کاهش میزان رطوبت طی فرایند سرخ‌کردن به شکل نمایی بود. به عنوان مثال، در مورد نمونه شاهد سرخ‌شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۱-الف) حدود ۴۰٪ از رطوبت خارج‌شده از سیب‌زمینی در همان شصت ثانیه اول فرایند از آن خارج شد و سرعت خروج رطوبت با گذشت زمان کاهش یافت؛ به طوری که در ثانیه ۲۴۰ فرایند، حدود ۱۶ درصد از رطوبت خارج‌شده از نمونه از آن جدا شد. افت سریع رطوبت در لحظات اولیه فرایند مرتبط با حذف رطوبت سطحی می‌باشد و با کاهش رطوبت سطحی با گذشت زمان، سرعت افت رطوبت ماده غذایی کاهش پیدا می‌کند (Dehghan Nasiri *et al.*, 2010). عده زیادی از محققان، نتایج مشابهی در مورد مواد غذایی مختلف گزارش کرده‌اند (Ngadi *et al.*, 2007; Oztop *et al.*, 2007; Adedeji *et al.*, 2009).

لازم به توضیح است که بر خلاف انتظار، اعمال پیش‌ تیمار اولتراسوند، میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها را افزایش داد ولی این افزایش از لحاظ آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود. این پیش‌ تیمار با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز حدود ۵٪ و با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز حدود ۲/۸ درصد میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها را در مقایسه با نمونه شاهد افزایش داد. جدول ۳، مقایسه میانگین میزان رطوبت نمونه‌های پیش- تیمار شده با اولتراسوند را در فرایند سرخ‌کردن نشان می‌دهد. همان-طور که در این جدول مشاهده می‌شود، اعمال پیش‌ تیمار اولتراسوند، به‌طور معنی‌داری میزان رطوبت نمونه‌ها را در فرایند سرخ‌کردن کاهش داد. همچنین، نتیجه مقایسه میانگین نشان می‌دهد که اختلاف بین نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز غیرمعنی‌دار بود؛ اما با افزایش فرکانس این پیش‌ تیمار، میزان رطوبت به میزان بیشتری کاهش یافت. پیش‌ تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز میزان رطوبت نمونه سرخ‌شده در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴۰ ثانیه را حدود ۱۳٪، و پیش‌ تیمار

(Fernandes *et al.*, 2008).

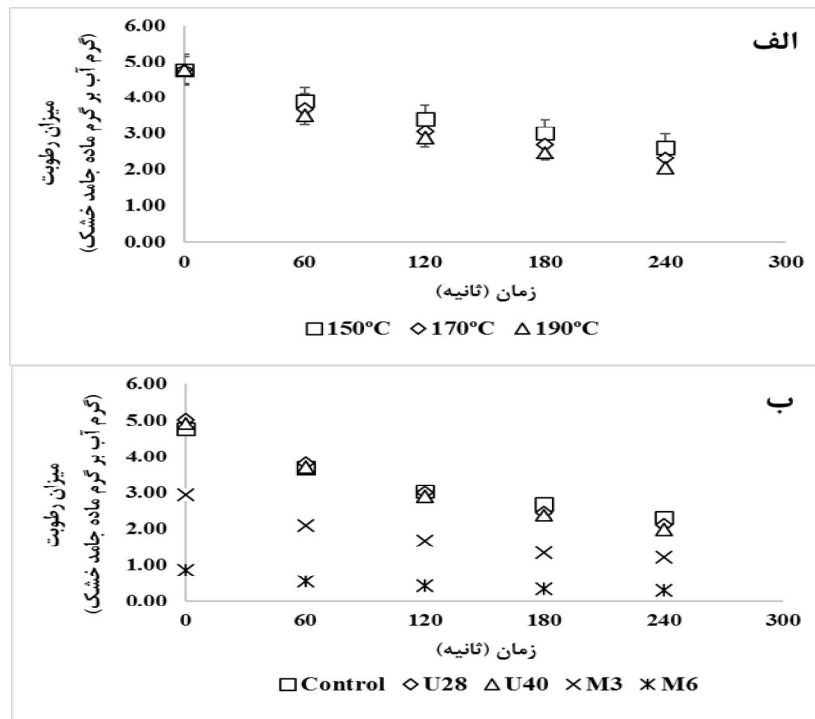
نتایج حاصل در رابطه با اثر متقابل سه فاکتور زمان، دما و پیش- تیمار اولتراسوند نشان داد که اثر متقابل این سه فاکتور بر میزان رطوبت نمونه‌ها در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار نبوده است؛ هر چند میزان رطوبت نمونه‌ها با افزایش دما و زمان در فرکانس ثابت و همچنین با افزایش فرکانس پیش تیمار اولتراسوند در دما و زمان ثابت، کاهش پیدا کرد (جدول ۴).

اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز حدود ۱۷٪ در مقایسه با نمونه شاهد کاهش داد (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). این نتایج، با نتایج سایر پژوهش‌ها که از امواج اولتراسوند به عنوان پیش تیمار در فرایند خشک کردن استفاده کرده‌اند، مطابقت دارد (Fernandes *et al.*, 2008). علت کاهش میزان رطوبت نهایی نمونه‌های پیش تیمار شده با اولتراسوند، احتمالاً به دلیل ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در بافت ماده غذایی و تسهیل انتشار رطوبت طی فرایند سرخ کردن می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه میانگین مربعات میزان رطوبت (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک) در دماها و زمان‌های مختلف سرخ کردن

| زمان سرخ کردن (ثانیه) | | | دمای سرخ کردن (درجه سانتی‌گراد) | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ۲۴۰ | ۱۸۰ | ۱۲۰ | ۶۰ | ۱۹۰ | ۱۷۰ | ۱۵۰ |
| ۱/۱۲۶۳ ^d | ۱/۳۵۸۹ ^c | ۱/۵۹۷۴ ^b | ۱/۸۶۳۵ ^a | ۱/۴۳۶۲ ^a | ۱/۴۶۶۶ ^a | ۱/۵۶۴۳ ^a |

حروف مشابه در ردیف مربوط، نشانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد است ($P < 0.05$). خطای میانگین مربعات برابر ± 0.12 می باشد.



شکل ۱- کاهش رطوبت نمونه‌های شاهد سرخ شده در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد (الف) و کاهش میزان رطوبت نمونه‌های شاهد، پیش تیمار شده با اولتراسوند و میکروویو و سرخ شده در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد (ب)

جدول ۳- مقایسه میانگین مربعات میزان رطوبت (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک) در فرکانس‌های مختلف پیش تیمار اولتراسوند و توان‌های مختلف تیمار میکروویو در فرایند سرخ کردن

| میکروویو در فرایند سرخ کردن | | | فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز) | | |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|
| توان میکروویو (وات بر گرم) | | | فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز) | | |
| ۶ | ۳ | ۰ | ۴۰ | ۲۸ | ۰ |
| ۰/۳۱۳۹ ^c | ۱/۲۹۸ ^b | ۲/۸۵۵۱ ^a | ۱/۳۵۴۷ ^b | ۱/۴۵۸۱ ^b | ۱/۶۵۴۳ ^a |

حروف مشابه در ردیف مربوط، نشانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد است ($P < 0.05$). خطای میانگین مربعات برابر ± 0.12 می باشد.

نمونه‌های پیش تیمار شده با میکروویو در مقایسه با نمونه شاهد به طور معنی داری از لحاظ آماری کاهش یافت که در تطابق با نتایج

جدول ۳، نتایج مقایسه میانگین میزان رطوبت نمونه‌های پیش- تیمار شده با میکروویو را نشان می‌دهد. طبق نتایج، میزان رطوبت

در مورد نمونه‌هایی که به صورت تلفیقی هر دو پیش‌ تیمار اولتراسوند و مایکروویو روی آن‌ها اعمال شد، نتایج نشان داد که کاهش رطوبت این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد و همچنین در مقایسه با نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با اولتراسوند یا مایکروویو از لحاظ آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶)؛ بطوری که نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با اولتراسوند ۴۰ کیلوهرتز و مایکروویو ۶ وات بر گرم به صورت تلفیقی و سرخ‌ شده در دمای ۱۹۰ درجه سانتی- گراد با میزان رطوبت ۰/۱۰۹۱ گرم آب بر گرم ماده جامد خشک، کمترین میزان رطوبت را داشت که به طور تقریبی ۹۰ درصد در مقایسه با نمونه شاهد کمتر بود.

مدل‌سازی افت رطوبت

شکل ۲، نمودار نسبت رطوبت (MR) نمونه‌های مختلف مطالعه- شده را نشان می‌دهد. نسبت رطوبت نمونه‌های مختلف با افزایش زمان و دمای فرایند کاهش پیدا کرد. همچنین، اعمال هر دو پیش- تیمار مایکروویو و اولتراسوند نیز مقدار نسبت رطوبت را در همه دماها کاهش داد. در این میان، پیش‌ تیمار مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم بیشتر از بقیه پیش‌ تیمارهایی که با اولتراسوند یا مایکروویو مورد عمل- آوری قرار گرفته بودند، باعث کاهش رطوبت گردید. این امر احتمالاً به دلیل تغییرات ساختاری ایجاد شده در بافت محصول و تسهیل بیشتر خروج رطوبت در اثر به‌ کارگیری امواج مایکروویو با توان بالاتر در مقایسه با پیش‌ تیمارهای دیگر بود. نمونه‌هایی که بصورت تلفیقی تحت هر دو پیش‌ تیمار قرار گرفتند، مقدار نسبت رطوبت کمتری نسبت به نمونه شاهد و پیش‌ تیمار شده با اولتراسوند یا مایکروویو را نشان دادند.

نتایج مدل‌سازی افت رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ‌ کردن در جدول ۷ نشان داده شده است. جدول ۸، نیز مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت (D_{eff}) نمونه‌های مختلف سرخ‌ شده شاهد، پیش‌ تیمار شده با اولتراسوند، مایکروویو و همچنین پیش‌ تیمار شده به صورت تلفیقی با مایکروویو و اولتراسوند را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق این جدول، ضریب انتشار مؤثر رطوبت برای نمونه- های مختلف در دامنه 10^{-8} الی $3/57 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه به‌ دست آمد. مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت قطعات سیب‌زمینی برای تمام نمونه‌ها با افزایش دما افزایش یافت و این روند با نتایج گزارش شده در مورد قطعات سیب‌زمینی سرخ‌ شده تحت خلأ (Troncoso & Pedreschi, 2009) و (Adedeji et al., 2009; Dehghan Nasiri et al., 2010;) (Soorgi et al., 2010) مطابقت دارد.

در مورد نمونه‌هایی که تحت پیش‌ تیمار اولتراسوند قرار گرفتند، مقدار D_{eff} افزایش پیدا کرد ولی اختلاف بین دو فرکانس این پیش- تیمار در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود. افزایش ضریب انتشار

حاصل توسط سایر محققان می‌باشد (Song et al., 2007; Adedeji et al., 2009; Ngadi et al., 2009; Soorgi et al., 2010). اعمال پیش‌ تیمار مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم و ۶ وات بر گرم، میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها را به ترتیب ۳۸ و ۸۰ درصد کاهش دادند. همچنین، در مورد نمونه‌هایی که به مدت ۲۴۰ ثانیه در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد سرخ شدند، میزان رطوبت به ترتیب ۱/۲۱۶۵ و ۰/۲۹۲۶ گرم آب بر گرم ماده جامد خشک بود که در مقایسه با نمونه‌های شاهد سرخ‌ شده به مدت ۲۴۰ ثانیه، ۴۷ و ۸۷ درصد کاهش نشان داد. افزایش توان پیش‌ تیمار مایکروویو از ۳ به ۶ وات بر گرم، میزان رطوبت اولیه و متعاقب آن میزان رطوبت محصول نهایی را به شکل معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد کاهش داد. همچنین، پیش‌ تیمار مایکروویو به طور آشکاری میزان رطوبت نمونه‌ها را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش زمان فرایند شد. از طرف دیگر، افت بیشتر رطوبت در اثر توان بالای پیش‌ تیمار مایکروویو احتمالاً به دلیل شدت بالای انرژی الکترومغناطیسی در نتیجه طبیعت گرمایش حجمی^۱ در محیط مایکروویو باشد (Adedeji et al., 2009). بر اساس قانون لامبرت^۲ در جذب توان مایکروویو، توان اولیه^۳ مایکروویو به صورت نمایی از سطح به عمق نمونه کاهش می‌یابد. در توان‌های اولیه پایین، بیشترین میزان گرمایش در سطح نمونه ایجاد شده و بنابراین، میزان دفع رطوبت از مرکز به سطح کاهش پیدا می‌کند. همچنین، طبق نتایج جدول ۳، میزان رطوبت نمونه‌های پیش‌ تیمار- شده با مایکروویو پایین‌تر از نمونه شاهد به‌ دست آمد. این پیش‌ تیمار، بطور قابل ملاحظه‌ای میزان رطوبت آزاد اولیه نمونه‌ها را کاهش می- دهد (Ngadi et al., 2009) و در نتیجه باعث کاهش زمان فرایند می‌شود (Krokida et al., 2001).

طبق نتایج، اثر متقابل سه فاکتور زمان، دما و پیش‌ تیمار مایکروویو روی میزان رطوبت نمونه‌ها در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). با افزایش توان پیش‌ تیمار مایکروویو در دما و زمان‌های ثابت، میزان رطوبت قطعات سیب‌زمینی سرخ‌ شده به شکل معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد کاهش یافت. همچنین، در توان ثابت پیش‌ تیمار مایکروویو نیز با افزایش زمان و دمای فرایند، میزان رطوبت نمونه‌ها به طور معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد کاهش پیدا کرد. بعنوان مثال، در مورد نمونه‌های سرخ‌ شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ ثانیه که با میزان رطوبت ۳/۹۹ گرم آب بر گرم ماده جامد خشک بیشترین میزان رطوبت را در بین نمونه‌های مختلف داشت. اعمال پیش‌ تیمار مایکروویو با توان‌های ۳ و ۶ وات بر گرم، میزان رطوبت را به ترتیب تا ۱/۸۹ و ۰/۴۹ گرم آب بر گرم ماده جامد خشک کاهش داد.

- 1 Volumetric Heating
- 2 Lambert
- 3 Incident Power

رطوبت در اثر اعمال پیش‌تیمار مایکروویو نسبت به نمونه‌های شاهد گزارش شده است (Adedeji *et al.*, 2009). بالاترین میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل در دماهای مختلف، مربوط به نمونه پیش‌تیمارشده تلفیقی با امواج اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و امواج مایکروویو با توان ۶ وات گرم بود.

مؤثر رطوبت در اثر اعمال پیش‌تیمار اولتراسوند را می‌توان به تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و تغییرات ساختاری ایجادشده در این نمونه‌ها نسبت داد (Fernandes *et al.*, 2008). همچنین، اعمال پیش‌تیمار مایکروویو مقدار D_{eff} را افزایش داد. در پژوهش‌های مشابه دیگر روی نمونه‌های ناگت مرغ نیز افزایش ضریب انتشار مؤثر جدول ۴ - مقایسه میانگین مربعات اثر متقابل زمان سرخ‌کردن، دمای سرخ‌کردن و فرکانس اولتراسوند بر میزان رطوبت سیب‌زمینی حین فرایند سرخ‌کردن

| میزان رطوبت* (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک) | فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز) | دمای سرخ‌کردن (°C) | زمان سرخ‌کردن (ثانیه) |
|---|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| ۲/۲۴ ^a | . | ۱۵۰ | ۶۰ |
| ۱/۶۷ ^a | . | ۱۵۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۵۴ ^a | . | ۱۵۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۵۲ ^a | . | ۱۵۰ | ۲۴۰ |
| ۲/۰۰ ^a | . | ۱۷۰ | ۶۰ |
| ۱/۹۵ ^a | . | ۱۷۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۳۳ ^a | . | ۱۷۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۳۳ ^a | . | ۱۷۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۸۰ ^a | . | ۱۹۰ | ۶۰ |
| ۱/۶۴ ^a | . | ۱۹۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۶۸ ^a | . | ۱۹۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۱۱ ^a | . | ۱۹۰ | ۲۴۰ |
| ۲/۱۱ ^a | ۲۸ | ۱۵۰ | ۶۰ |
| ۱/۳۹ ^a | ۲۸ | ۱۵۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۲۹ ^a | ۲۸ | ۱۵۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۳۱ ^a | ۲۸ | ۱۵۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۷۵ ^a | ۲۸ | ۱۷۰ | ۶۰ |
| ۱/۷۷ ^a | ۲۸ | ۱۷۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۰۷ ^a | ۲۸ | ۱۷۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۰۳ ^a | ۲۸ | ۱۷۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۶۰ ^a | ۲۸ | ۱۹۰ | ۶۰ |
| ۱/۵۷ ^a | ۲۸ | ۱۹۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۶۷ ^a | ۲۸ | ۱۹۰ | ۱۸۰ |
| -/۹۳ ^a | ۲۸ | ۱۹۰ | ۲۴۰ |
| ۲/۰۲ ^a | ۴۰ | ۱۵۰ | ۶۰ |
| ۱/۲۷ ^a | ۴۰ | ۱۵۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۱۸ ^a | ۴۰ | ۱۵۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۱۸ ^a | ۴۰ | ۱۵۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۶۹ ^a | ۴۰ | ۱۷۰ | ۶۰ |
| ۱/۷۱/۱ ^a | ۴۰ | ۱۷۰ | ۱۲۰ |
| -/۹۹ ^a | ۴۰ | ۱۷۰ | ۱۸۰ |
| -/۹۶ ^a | ۴۰ | ۱۷۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۵۴ ^a | ۴۰ | ۱۹۰ | ۶۰ |
| ۱/۳۷ ^a | ۴۰ | ۱۹۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۵۲ ^a | ۴۰ | ۱۹۰ | ۱۸۰ |
| -/۸۳ ^a | ۴۰ | ۱۹۰ | ۲۴۰ |

* خطای میانگین مربعات برابر $\pm 1/42$ می باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین مربعات اثر متقابل زمان سرخ کردن، دمای سرخ کردن و توان مایکروویو بر میزان رطوبت سیب زمینی حین فرایند سرخ کردن

| میزان رطوبت (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک) | توان مایکروویو (وات بر گرم) | دمای سرخ کردن (°C) | زمان سرخ کردن (ثانیه) |
|--|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| ۳/۹۹ ^a | ۰ | ۱۵۰ | ۶۰ |
| ۲/۴۳ ^{gh} | ۰ | ۱۵۰ | ۱۲۰ |
| ۲/۵۰ ^{fgh} | ۰ | ۱۵۰ | ۱۸۰ |
| ۲/۷۴ ^{efg} | ۰ | ۱۵۰ | ۲۴۰ |
| ۳/۲۷ ^{cd} | ۰ | ۱۷۰ | ۶۰ |
| ۳/۷۳ ^{ab} | ۰ | ۱۷۰ | ۱۲۰ |
| ۲/۱۲ ^{hi} | ۰ | ۱۷۰ | ۱۸۰ |
| ۲/۲۰ ^{hi} | ۰ | ۱۷۰ | ۲۴۰ |
| ۲/۸۴ ^{ef} | ۰ | ۱۹۰ | ۶۰ |
| ۲/۹۸ ^{de} | ۰ | ۱۹۰ | ۱۲۰ |
| ۳/۵۷ ^{bc} | ۰ | ۱۹۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۸۳ ^{ij} | ۰ | ۱۹۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۸۹ ^{ij} | ۳ | ۱۵۰ | ۶۰ |
| ۱/۵۰ ^{jkl} | ۳ | ۱۵۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۵۲ ^{lmno} | ۳ | ۱۵۰ | ۱۸۰ |
| ۱/۰۴ ^{mno} | ۳ | ۱۵۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۱۷۲ ^{jk} | ۳ | ۱۷۰ | ۶۰ |
| ۱/۳۴ ^{klm} | ۳ | ۱۷۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۰۳ ^{mno} | ۳ | ۱۷۰ | ۱۸۰ |
| ۰/۹۱ ^{no} | ۳ | ۱۷۰ | ۲۴۰ |
| ۱/۶۵ ^{jkl} | ۳ | ۱۹۰ | ۶۰ |
| ۱/۲۹ ^{lmn} | ۳ | ۱۹۰ | ۱۲۰ |
| ۱/۰۳ ^{mno} | ۳ | ۱۹۰ | ۱۸۰ |
| ۰/۸۴ ^{op} | ۳ | ۱۹۰ | ۲۴۰ |
| ۰/۴۹ ^{pq} | ۶ | ۱۵۰ | ۶۰ |
| ۰/۳۹ ^q | ۶ | ۱۵۰ | ۱۲۰ |
| ۰/۲۶ ^q | ۶ | ۱۵۰ | ۱۸۰ |
| ۰/۲۱ ^q | ۶ | ۱۵۰ | ۲۴۰ |
| ۰/۴۵ ^q | ۶ | ۱۷۰ | ۶۰ |
| ۰/۳۶ ^q | ۶ | ۱۷۰ | ۱۲۰ |
| ۰/۲۳ ^q | ۶ | ۱۷۰ | ۱۸۰ |
| ۰/۱۹ ^q | ۶ | ۱۷۰ | ۲۴۰ |
| ۰/۴۳ ^q | ۶ | ۱۹۰ | ۶۰ |
| ۰/۳۳ ^q | ۶ | ۱۹۰ | ۱۲۰ |
| ۰/۲۲ ^q | ۶ | ۱۹۰ | ۱۸۰ |
| ۰/۱۷ ^q | ۶ | ۱۹۰ | ۲۴۰ |

* خطای میانگین مربعات برابر ± 0.3 می باشد.

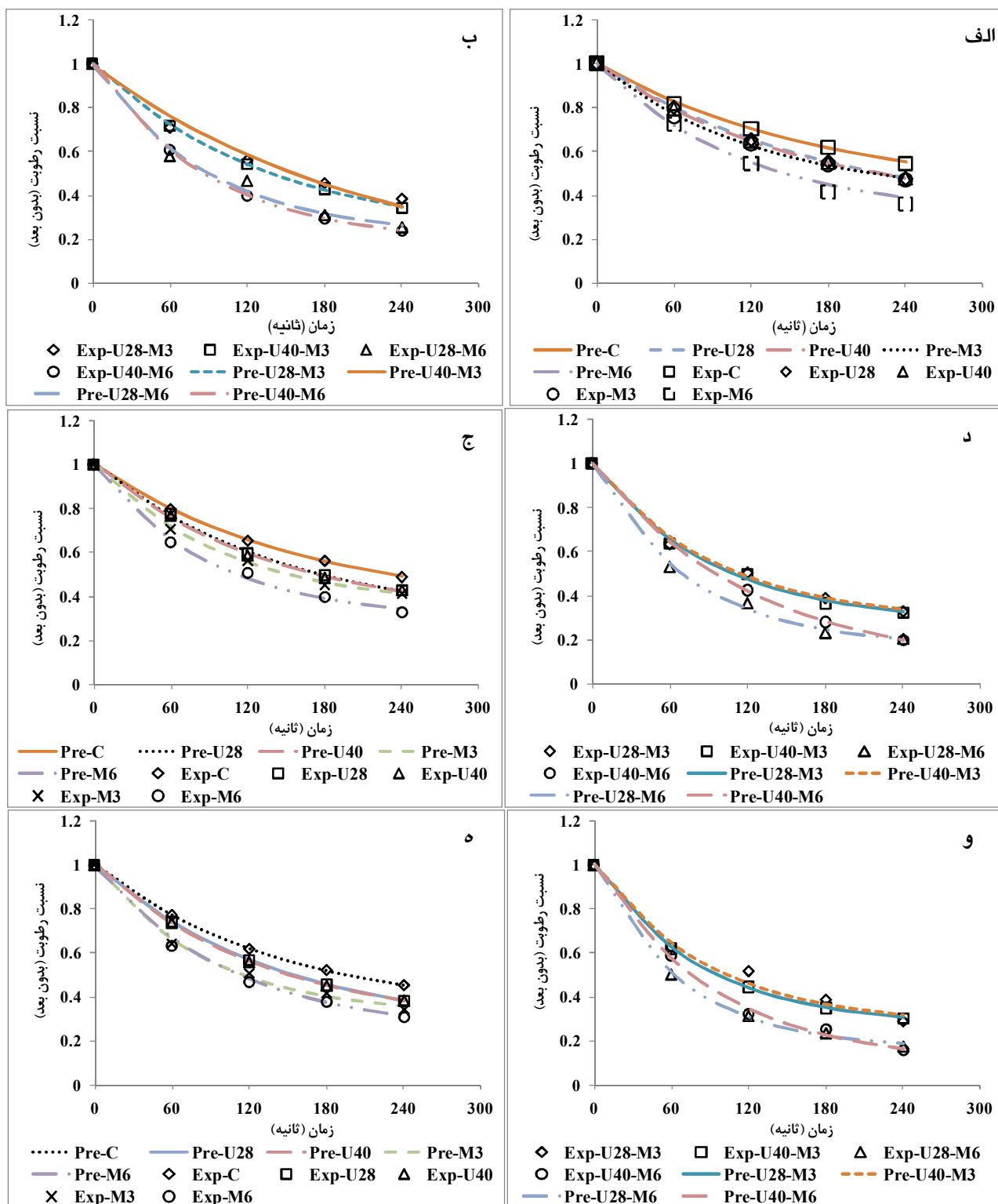
جدول ۶- مقایسه میانگین مربعات اثر متقابل دمای سرخ کردن، توان مایکروویو و فرکانس اولتراسوند بر میزان رطوبت سیب زمینی حین فرایند سرخ کردن

| میزان رطوبت (گرم آب بر گرم ماده جامد خشک) | فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز) | توان مایکروویو (وات بر گرم) | دما (°C) |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-------------|
| ۳/۰۱ ^a | . | . | ۱۵۰ |
| ۲/۹۵ ^a | . | . | ۱۷۰ |
| ۲/۹۰ ^a | . | . | ۱۹۰ |
| ۱/۷۶ ^b | . | ۳ | ۱۵۰ |
| ۱/۷۵ ^b | . | ۳ | ۱۷۰ |
| ۱/۴۰ ^b | . | ۳ | ۱۹۰ |
| ۰/۴۵ ^{cd} | . | ۶ | ۱۵۰ |
| ۰/۴۳ ^{cd} | . | ۶ | ۱۷۰ |
| ۰/۳۳ ^{cd} | . | ۶ | ۱۹۰ |
| ۲/۹۳ ^a | ۲۸ | . | ۱۵۰ |
| ۲/۸۲ ^a | ۲۸ | . | ۱۷۰ |
| ۱/۲۸۰ ^a | ۲۸ | . | ۱۹۰ |
| ۱/۳۷ ^b | ۲۸ | ۳ | ۱۵۰ |
| ۱/۱۶ ^{bcd} | ۲۸ | ۳ | ۱۷۰ |
| ۱/۲۳ ^{bc} | ۲۸ | ۳ | ۱۹۰ |
| ۰/۲۹ ^{def} | ۲۸ | ۶ | ۱۵۰ |
| ۰/۲۴ ^f | ۲۸ | ۶ | ۱۷۰ |
| ۰/۲۶ ^f | ۲۸ | ۶ | ۱۹۰ |
| ۲/۸۳ ^a | ۴۰ | . | ۱۵۰ |
| ۲/۷۴ ^a | ۴۰ | . | ۱۷۰ |
| ۲/۷۱ ^a | ۴۰ | . | ۱۹۰ |
| ۱/۱۵ ^{bcd} | ۴۰ | ۳ | ۱۵۰ |
| ۱/۰۳ ^{bcdef} | ۴۰ | ۳ | ۱۷۰ |
| ۰/۹۴ ^{bcdef} | ۴۰ | ۳ | ۱۹۰ |
| ۰/۲۶ ^f | ۴۰ | ۶ | ۱۵۰ |
| ۰/۲۶ ^{ef} | ۴۰ | ۶ | ۱۷۰ |
| ۰/۲۳ ^f | ۴۰ | ۶ | ۱۹۰ |

* خطای میانگین مربعات برابر ۰/۲۱ ± می باشد.

جدول ۷- مدل سازی افت رطوبت قطعات سیب زمینی طی فرایند سرخ کردن

| مرجع | مدل | شماره |
|--------------|---|-------|
| کرنک (۱۹۷۵) | $MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right]$ | ۱ |
| مدل پیشنهادی | $MR = a \exp(-bt) + c$ | ۲ |
| مدل پیشنهادی | $MR = at + b$ | ۳ |
| مدل پیشنهادی | $MR = 1/(at + b)$ | ۴ |
| مدل پیشنهادی | $MR = at^b$ | ۵ |
| مدل پیشنهادی | $MR = a \exp(bt)$ | ۶ |
| مدل پیشنهادی | $MR = \exp(-at)$ | ۷ |



شکل ۲- جذب روغن قطعات سیب‌زمینی بر اساس داده‌های آزمایشی (Exp) و داده‌های حاصل از برازش (Pre) در شرایط مختلف آزمایشگاهی با مدل ۲ جدول ۷ در دماهای ۱۵۰ (الف، ب)، ۱۷۰ (ج، د) و ۱۹۰ (ه، و) درجه سانتی‌گراد

چندمتغیره برای ضرایب مدل‌های ارائه‌شده در جدول ۷ بر اساس شرایط فرایند (دما، توان مایکروویو و فرکانس اولتراسوند)، می‌توان فرایند را با توجه به شرایط بهینه کنترل کرد و محصولی با کیفیت تعیین‌شده تولید نمود (جدول ۱۰).

نتایج حاصل از برازش مدل‌ها (جدول ۹) نشان داد که مدل ۲، دارای R^2 بالاتر و RMSE پائین‌تری بوده و بهترین مدل برای برازش داده‌های تجربی حاصله تحت شرایط آزمایش می‌باشد. از طرف دیگر، با استفاده از مدل‌های حاصل از آنالیز رگرسیونی

جدول ۸- مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت (D_{eff}) در دماها و تیمارهای مختلف

| دما (°C) | | | تیمار |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------|
| ۱۹۰ | ۱۷۰ | ۱۵۰ | |
| $D_{eff} (\times 10^{-11})$ | $D_{eff} (\times 10^{-11})$ | $D_{eff} (\times 10^{-11})$ | |
| ۴/۸۱ | ۴/۳ | ۳/۵۷ | Control |
| ۵/۹۸ | ۵/۳۹ | ۴/۵۲ | M3 |
| ۶/۹۳ | ۶/۶۳ | ۶/۴۱ | M6 |
| ۵/۸۳ | ۵/۲۳ | ۴/۵۲ | U28 |
| ۵/۸۳ | ۵/۱۷ | ۴/۵۲ | U40 |
| ۷/۲۲ | ۶/۵۶ | ۵/۷۶ | U28-M3 |
| ۷/۲۲ | ۶/۷۸ | ۶/۴۹ | U40-M3 |
| ۱۰/۳ | ۹/۷۵ | ۸/۱۷ | U28-M6 |
| ۱۱/۰۸ | ۹/۹۲ | ۸/۷۵ | U40-M6 |

جدول ۹- پارامترهای آماری حاصل برای مدل‌سازی افت رطوبت قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ‌کردن (مدل‌های ۱-۷ جدول ۷) در دماها و تیمارهای مختلف

| دما (°C) | | | تیمار |
|----------|-------|-------|---------|
| ۱۹۰ | ۱۷۰ | ۱۵۰ | |
| R^2 | R^2 | R^2 | |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | Control |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۸ | ۰/۹۸ | U28 |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۸ | ۰/۹۹ | U40 |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | M3 |
| ۰/۹۹ | ۱ | ۰/۹۶ | M6 |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | U28-M3 |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | U40-M3 |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | U28-M6 |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | U40-M6 |

مدل ۲:

$$MR = a \exp(-bt) + c$$

| دما (°C) | | | | | | تیمار |
|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R^2 | RMSE | R^2 | RMSE | R^2 | |
| ۰/۰۰۱۸۳ | ۱ | ۰/۰۳۷۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۵ | ۰/۹۹ | Control |
| ۰/۰۰۲۶۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۱۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۳۱ | ۰/۹۹ | U28 |
| ۰/۰۰۴۰۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۷۳ | ۱ | U40 |
| ۰/۰۰۲۳۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۲۴ | ۰/۹۹ | M3 |
| ۰/۰۰۴۳۶ | ۰/۹۸ | ۰/۰۰۲۵۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۱۳ | ۰/۹۹ | M6 |
| ۰/۰۰۴۵۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۳۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۸۲ | ۰/۹۹ | U28-M3 |
| ۰/۰۰۱۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۴۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۳۳ | ۰/۹۸ | U40-M3 |

| | | | | | | |
|--------|------|---------|------|--------|------|--------|
| ۰/۰۱۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۱۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۵۷۳ | ۰/۹۷ | U28-M6 |
| ۰/۰۲۶۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹ | U40-M6 |

مدل ۳:
MR = at + b

دما (°C)

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|---------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۳۱۵ | ۰/۹۳ | ۰/۲۷۴ | ۰/۹۳ | ۰/۱۷۳ | ۰/۹۶ | Control |
| ۰/۳۵۷ | ۰/۹۴ | ۰/۳۰۷ | ۰/۹۴ | ۰/۲۲۸ | ۰/۹۶ | U28 |
| ۰/۳۷۰ | ۰/۹۳ | ۰/۳۰۶ | ۰/۹۴ | ۰/۲۱۶ | ۰/۹۶ | U40 |
| ۰/۳۰۱ | ۰/۸۸ | ۰/۲۴۹ | ۰/۹۰ | ۰/۱۸۵ | ۰/۹۳ | M3 |
| ۰/۲۵۲ | ۰/۹۱ | ۰/۳۰۲ | ۰/۸۷ | ۰/۲۳۷ | ۰/۹۰ | M6 |
| ۰/۲۷۱ | ۰/۸۶ | ۰/۲۳۸ | ۰/۸۹ | ۰/۱۶۵ | ۰/۹۴ | U28-M3 |
| ۰/۱۱۹ | ۰/۸۲ | ۰/۱۱۱ | ۰/۸۴ | ۰/۰۸۷ | ۰/۸۸ | U40-M3 |
| ۰/۱۰۳ | ۰/۸۵ | ۰/۰۹۸ | ۰/۸۵ | ۰/۰۵۶ | ۰/۹۵ | U28-M6 |
| ۰/۰۹۳ | ۰/۸۸ | ۰/۰۶۹ | ۰/۹۲ | ۰/۰۸۵ | ۰/۸۸ | U40-M6 |

مدل ۴:
MR = 1/(at + b)

دما (°C)

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۰۳۷۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۴۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۳۹ | ۰/۹۹ | Control |
| ۰/۰۱۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۰۴ | ۰/۹۹ | U28 |
| ۰/۰۱۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۴۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۵۱ | ۰/۹۹ | U40 |
| ۰/۰۱۸۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۰۷ | ۰/۹۹ | M3 |
| ۰/۰۲۹۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۶۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۱۱ | ۰/۹۹ | M6 |
| ۰/۰۰۸۷۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۶۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۷۱ | ۰/۹۹ | U28-M3 |
| ۰/۰۱۴۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۲۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۹۹ | ۰/۹۸ | U40-M3 |
| ۰/۰۰۵۲۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۰۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۵۸۱ | ۰/۹۶ | U28-M6 |
| ۰/۰۵۳۴ | ۰/۹۸ | ۰/۰۵۲۹ | ۰/۹۷ | ۰/۰۲۲۹ | ۰/۹۹ | U40-M6 |

مدل ۵:
MR = at^b

دما (°C)

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۲۸۳ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۱۶ | ۰/۹۸ | Control |
| ۰/۰۲۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۷۳ | ۰/۹۸ | ۰/۰۱۸۹ | ۰/۹۹ | U28 |
| ۰/۰۲۹۹ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۱۶ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۳۹ | ۰/۹۹ | U40 |
| ۰/۰۵۸۴ | ۰/۹۶ | ۰/۰۴۷۷ | ۰/۹۶ | ۰/۰۳۴۹ | ۰/۹۷ | M3 |
| ۰/۰۵۰۴ | ۰/۹۷ | ۰/۰۵۶ | ۰/۹۶ | ۰/۰۳۸۱ | ۰/۹۸ | M6 |
| ۰/۰۵۹۵ | ۰/۹۶ | ۰/۰۵۳۶ | ۰/۹۷ | ۰/۰۲۵۲ | ۰/۹۹ | U28-M3 |
| ۰/۰۶۰۲ | ۰/۹۷ | ۰/۰۵۶۶ | ۰/۹۷ | ۰/۰۵۷ | ۰/۹۷ | U40-M3 |

| | | | | | | |
|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| U28-M6 | ۰/۹۷ | ۰/۰۴۶۸ | ۰/۹۷ | ۰/۰۵۰۶ | ۰/۹۷ | ۰/۰۵۴۱ |
| U40-M6 | ۰/۹۸ | ۰/۰۴۳۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۳۴۲ |

مدل ۶: $MR = a \exp(bt)$

دما (°C)

| تیمار | ۱۵۰ | | ۱۷۰ | | ۱۹۰ | |
|---------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|
| | RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² |
| Control | ۰/۰۲۱۹ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۲۹ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۷۵ | ۰/۹۸ |
| U28 | ۰/۰۱۸۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۵۲ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۴۶ | ۰/۹۹ |
| U40 | ۰/۰۲۳۳ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۹۲ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۸۲ | ۰/۹۸ |
| M3 | ۰/۰۳۴۸ | ۰/۹۷ | ۰/۰۴۵۹ | ۰/۹۶ | ۰/۰۵۳۶ | ۰/۹۵ |
| M6 | ۰/۰۳۷۱ | ۰/۹۷ | ۰/۰۵۳۷ | ۰/۹۵ | ۰/۰۴۷۹ | ۰/۹۶ |
| U28-M3 | ۰/۰۲۴۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۵۰۷ | ۰/۹۶ | ۰/۰۵۵۶ | ۰/۹۶ |
| U40-M3 | ۰/۰۵۳۲ | ۰/۹۶ | ۰/۰۵۱۵ | ۰/۹۷ | ۰/۰۴۵۵ | ۰/۹۷ |
| U28-M6 | ۰/۰۴۰۹ | ۰/۹۷ | ۰/۰۴۸۶ | ۰/۹۶ | ۰/۰۵۱۲ | ۰/۹۶ |
| U40-M6 | ۰/۰۳۹۹ | ۰/۹۸ | ۰/۰۱۰۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۳۰۱ | ۰/۹۹ |

مدل ۷: $MR = \exp(-at)$

دما (°C)

| تیمار | ۱۵۰ | | ۱۷۰ | | ۱۹۰ | |
|---------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|
| | RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² |
| Control | ۰/۰۹۹۳ | ۰/۹۸ | ۰/۱۶۲ | ۰/۹۷ | ۰/۱۷۵ | ۰/۹۷ |
| U28 | ۰/۱ | ۰/۹۹ | ۰/۱۲۹ | ۰/۹۹ | ۰/۱۱۸ | ۰/۹۹ |
| U40 | ۰/۰۸۴۷ | ۰/۹۹ | ۰/۱۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۱۲۵ | ۰/۹۹ |
| M3 | ۰/۱۱۱ | ۰/۹۷ | ۰/۱۴ | ۰/۹۶ | ۰/۱۷۲ | ۰/۹۶ |
| M6 | ۰/۱۲۲ | ۰/۹۷ | ۰/۱۵۵ | ۰/۹۶ | ۰/۱۳۳ | ۰/۹۷ |
| U28-M3 | ۰/۰۵۸ | ۰/۹۹ | ۰/۱۱۶ | ۰/۹۷ | ۰/۱۳۵ | ۰/۹۶ |
| U40-M3 | ۰/۰۴۲۵ | ۰/۹۷ | ۰/۰۴۳۷ | ۰/۹۷ | ۰/۰۴۴۷ | ۰/۹۷ |
| U28-M6 | ۰/۰۴۰۳ | ۰/۹۷ | ۰/۰۵۶۳ | ۰/۹۵ | ۰/۰۵۸۴ | ۰/۹۵ |
| U40-M6 | ۰/۰۳۰۴ | ۰/۹۸ | ۰/۰۰۹۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۳۹ | ۰/۹۹ |

انرژی فعال سازی

جدول ۱۱، مقدار انرژی فعال سازی ضریب انتشار مؤثر رطوبت را برای نمونه های مختلف نشان می دهد. انرژی فعال سازی در فرایندهای مرتبط با پدیده انتشار، شاخص مناسبی برای تشخیص میزان انتشار به عنوان مکانیسم غالب در آن فرایند است (Troncoso & Pedreschi, 2009).

معمولاً در مواد غذایی که دارای میزان رطوبت پائین تری هستند، به دلیل وجود واکنش های قوی بین آب و مواد تشکیل دهنده آن، میزان انرژی فعال سازی برای انتشار رطوبت بالاتر است (Saravacos & Maroulis, 2001). هر اندازه میزان انرژی فعال سازی بالاتر باشد، ضریب انتشار مؤثر رطوبت به دمای فرایند حساس تر می باشد (Troncoso & Pedreschi, 2009). انرژی فعال سازی برای نمونه های مختلف این پژوهش، در دامنه ۰/۳۵ تا ۳/۱۵۶ کیلوژول

برمول به دست آمد که بیشترین مقدار مربوط به نمونه شاهد و کمترین مقدار متعلق به نمونه پیش تیمار شده با مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم می باشد. این امر نشان می دهد که در مقایسه با سایر نمونه ها، در نمونه پیش تیمار شده با مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم، انتشار رطوبت با کمترین حساسیت نسبت به دما صورت می گیرد. این مسئله، احتمالاً به تسهیل پدیده انتشار در نتیجه تغییرات ساختاری ایجاد شده توسط امواج مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم مرتبط باشد.

مقدار انرژی فعال سازی برای نمونه های سیب زمینی شاهد، آنزیم-بری شده و آنزیم-بری و خشک شده به ترتیب ۶/۴ و ۵/۴ کیلوژول برمول گزارش شده است (Pedreschi et al., 2005). در پژوهش های مشابه در فرایند سرخ کردن، پیش تیمار مایکروویو (Adedeji et al., 2009) و پیش تیمار خشک کردن (Pedreschi et al., 2005) به ترتیب در مورد نمونه های ناگت مرغ و سیب زمینی، انرژی فعال سازی

علاوه بر این، نتایج نشان داد که اعمال پیش تیمار اولتراسوند منجر به کاهش انرژی فعال سازی در این نمونه‌ها می‌شود (جدول ۱۱). این امر احتمالاً به دلیل ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در بافت ماده غذایی و تغییرات ساختاری ایجاد شده باشد.

ضریب انتشار مؤثر رطوبت را در مقایسه با نمونه شاهد کاهش داد؛ اما در یک پژوهش دیگر، پیش تیمار مایکروویو در مورد نمونه ناگت مرغ، انرژی فعال سازی را افزایش داد و این امر به کاهش میزان رطوبت نسبت داده شد (Soorgi *et al.*, 2010).

جدول ۱۰- مدل سازی ثابت‌های مدل‌های جدول ۷ بر حسب شرایط فرایند توسط آنالیز رگرسیون چندمتغیره

| شماره مدل | R ² | ثابت‌های مدل‌ها* |
|-----------|----------------|--|
| ۱ | ۰/۹۶ | $D_{eff} = 0.0404U + 0.4389M + 0.0254T$ |
| ۲ | ۰/۹۹ | $a = 0.034U + 0.0191M + 0.036T$ |
| | ۰/۹۷ | $b = 1/78 \times 10^{-5}U + 3/8 \times 10^{-5}M + 0.007T$ |
| | ۰/۹۳ | $c = 0.0026U - 0.0159M + 0.021T$ |
| ۳ | ۰/۹۲ | $a = 0.002U + 0.0716M - 0.039T$ |
| | ۰/۹۱ | $b = 0.018U - 0.5355M + 0.0266T$ |
| ۴ | ۰/۹۷ | $a = 8/9 \times 10^{-5}U + 0.011M + 1/9 \times 10^{-5}T$ |
| | ۰/۹۹ | $b = 0.0004U + 0.042M + 0.057T$ |
| ۵ | ۰/۹۹ | $a = 0.0009U + 0.023M + 0.055T$ |
| | ۰/۹۹ | $b = 0.0006U + 0.035M + 0.056T$ |
| ۶ | ۰/۹۱ | $a = 0.0187U - 0.5485M + 0.0277T$ |
| | ۰/۹۹ | $b = 0.0026U - 0.285M + 0.009T$ |
| ۷ | ۰/۹۹ | $a = 4/11 \times 10^{-5}U + 0.005M + 1/62 \times 10^{-5}T$ |

* U، M و T به ترتیب فرکانس اولتراسوند (کیلوهرتز)، توان مایکروویو (وات بر گرم) و دمای فرایند (درجه سانتی‌گراد) می‌باشند.

جدول ۱۱- انرژی فعال سازی و ضریب تبیین برازش مدل آرنیوس بر نمونه‌های سیب زمینی بدون پیش تیمار (شاهد) و پیش تیمار شده با اولتراسوند و مایکروویو که طی فرایند سرخ کردن عمیق تهیه شده‌اند.

| تیمار | E _a (kJ/mol) | R ² |
|---------|-------------------------|----------------|
| Control | ۱۲/۱۵۶ | ۰/۹۸ |
| M3 | ۱۱/۴۰۸ | ۰/۹۸ |
| M6 | ۳/۰۳۵ | ۰/۹۹ |
| U28 | ۱۰/۳۸۶ | ۰/۹۸ |
| U40 | ۱۰/۳۶۹ | ۰/۹۹ |
| U28-M3 | ۹/۲۶۰ | ۰/۹۸ |
| U40-M3 | ۴/۳۱۸ | ۰/۹۸ |
| U28-M6 | ۹/۷۱۷ | ۰/۹۴ |
| U40-M6 | ۹/۶۴۱ | ۰/۹۸ |

تأثیر سینرژیستی ویژه‌ای در نتیجه به کار بردن همزمان پیش تیمارهای اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم در کاهش انرژی فعال سازی به وجود می‌آید. پژوهش‌های تکمیلی برای بررسی ساختار بافتی محصول، تحت شرایط مذکور، جالب توجه به نظر می‌رسد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده تلفیقی از امواج مایکروویو

مقدار انرژی فعال سازی برای نمونه‌های پیش تیمار شده تلفیقی کمتر از سایر نمونه‌ها (بجز نمونه پیش تیمار شده با مایکروویو با توان ۶ وات بر گرم) بود و این امر به اثر مثبت تلفیق این پیش تیمارها با فرکانس‌ها و توان‌های استفاده شده روی کاهش انرژی فعال سازی دلالت دارد. این در حالی است که اثر متقابل دو پیش تیمار اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و مایکروویو با توان ۳ وات بر گرم (U40-M3)، در مقایسه با سایر پیش تیمارهای تلفیقی در کاهش بیش از حد انرژی فعال سازی (جدول ۱۱) با توجه به مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت این نمونه‌ها در دماهای مختلف (جدول ۸) برخلاف انتظار بود. احتمالاً

مطالعات بسیار محدودی در ارتباط با کاربرد امواج اولتراسوند در فرایند سرخ کردن وجود دارد، پژوهش‌های تکمیلی در این مورد ضروری به نظر می‌رسد. مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش، می‌توانند جهت استفاده در فرایند سرخ کردن عمیق مفید باشند و به کنترل کیفیت محصول نهایی سرخ‌شده کمک کنند.

با توان‌های مختلف و امواج اولتراسوند با فرکانس‌های متفاوت می‌تواند به عنوان یک روش امیدبخش در پژوهش‌های مختلف از نقطه نظر بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی محصولات سرخ‌شده از جمله کاهش میزان رطوبت نمونه‌ها، افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و همچنین کاهش انرژی فعال‌سازی مدنظر قرار گیرد. با توجه به این که

منابع

- Adedeji, A.A., Ngadi, M.O., and Raghavan, G.S.V. 2009. Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering* 91(1), 146-153.
- AOAC. 1984. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists., Arlington, VA.
- Bravo, J., Sanjuan, N., Ruales, J., and Mulet, A. 2009. Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. *Drying Technology* 27(6), 782-786.
- Carriero, G., Anese, M., Quarta, B., Valeria De Bonis, M., and Ruocco, G. 2010. Evaluation of acrylamide formation in potatoes during deep-frying: The effect of operation and configuration. *Journal of Food Engineering* 98, 141-149.
- Debnath, S., Bhat, K.K., and Rastogi, N.K. 2003. Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food. *LWT-Food Science and Technology* 36(1), 91-98.
- Dehghan Nasiri, F., Mohebbi, M., Tabatabaee, Y.F., and Haddad, M.H.K. 2010. Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Bioprocess Technology* 89, 241-247.
- Farid, M., and Kizilel, R. 2009. A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying and frying of food products. *Chemical Engineering and Processing* 48(1), 217-223.
- Farinu, A., and Baik, O.D. 2008. Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweet potato. *Journal of Food Engineering* 89(2), 187-194.
- Farkas, B.E., Singh, R.P., and Rumsey, T.R. 1996. Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I. Model development. *Journal of Food Engineering* 29, 211-226.
- Fernandes, F.A.N., Linhares, F.E., and Rodrigues, S. 2008. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry* 15(6), 1049-1054.
- Fernandes, F.A.N., and Rodrigues, S. 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering* 82(2), 261-267.
- Gupta, P., Shivhare, U.S., and Bawa, A.S. 2000. Studies on frying kinetics and quality of French fries. *Drying Technology* 18, 311-321.
- Kassama, L.S., and Ngadi, M.O. 2005. Pore structure characterization of deep-fat-fried chicken meat. *Journal of Food Engineering* 66(3), 369-375.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z.B. 2000. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering* 43(3), 147-154.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, Z.B., Maroulis, D., and Marinou-Kouris, D. 2001. Deep fat frying of potato strips-quality issues. *Drying Technology* 19, 879-935.
- Kozempel, M.F., Tomasula, P.M., and Craig, J.C. 1991. Correlation of moisture and oil concentration in French fries. *LWT-Food Science and Technology* 24, 445-448.
- Math, R.G., Velu, V., Nagender, A., and Rao, D.G. 2004. Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *Journal of Food Engineering* 64, 429-434.
- Moreira, R.G., Castell-Perez, M.E., and Barrufet, M.A. 1999. Deep Fat Frying: Fundamentals and Applications. New York: Springer-Verlag.
- Moreira, R.G. 2002. Deep-fat frying of foods, in food processing operations modeling: Design and analysis. New York: Marcel Dekker.
- Moyano, P.C., Rioseco, V.K., and Gonzalez, P.A. 2002. Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated French fries. *Journal of Food Engineering* 54(3), 249-255.
- Moyano, P., and Berna, A.Z. 2002. Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technology* 20, 1303-1311.
- Ngadi, M.O., Wang, Y., Adedeji, A.A., and Raghavan, G.S.V. 2009. Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *LWT-Food Science and Technology*, 42(1), 438-440.
- Oztop, M.H., Sahin, S., and Sumnu, G. 2007. Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. *Journal of Food Engineering* 79(1), 83-91.
- Pedreschi, F., Hernandez, P., Figueroa, C., and Moyano, P.C. 2005. Modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties* 8, 289-299.

- Pedreschi, F., Moyano, P., Santis, N., and Pedreschi, R. 2007. Physical properties of pretreated potato chips. *Journal of Food Engineering* 79, 1474-1482.
- Roca, E., Guillard, V., Broyart, B., Guilbert, S., and Gontard, N. 2008. Effective moisture diffusivity modelling versus food structure and higrscopicity. *Food Chemistry* 106(4), 1428-1437.
- Sahin, S., and Sumnu, G. 2009. *Advances in deep-fat frying of foods*. New York: Taylor & Francis Group.
- Saravacos, G.D., and Maroulis, Z.B. 2001. *Transport properties of foods*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Singh, R.P. 1995. Heat and mass transfer in foods during frying. *Food Technology* 49(4), 134-137.
- Song, X.J., Zhang, M., and Mujumdar, A.S. 2007. Optimization of vacuum microwave predrying and vacuum frying conditions to produce fried potato chips. *Drying Technology* 25(12), 2027-2034.
- Soorgi, M., Mohebbi, M., Mousavi, S.M., and Shahidi, F. 2012. The Effect of methylcellulose, temperature, and microwave pretreatment on kinetic of mass transfer during deep fat frying of chicken nuggets. *Food and Bioproducts Processing* 89(3), 241-247.
- 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(6), 1164-1173.
- Williams, R., and Mittal, G.S. 1999. Low-fat fried foods with edible coatings: Modeling and simulation. *Journal of Food Science* 64, 317-322.
- Yildiz, A., Palazoglu, T.K., and Erdogdu, F. 2007. Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering* 79(1), 11-17.
- Ziaiiifar, A.M., 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 & Technology* 43(8), 1410-1423.

Moisture Loss Kinetics Modeling during Deep-Fat Frying of Potato Strips Pretreated with Ultrasound and Microwave

J. Dehghannya^{1*}, H. Bagheri-Darvish-Mohammad², B. Ghanbarzadeh³

Received: 2014.05.26

Accepted: 2015.02.21

Introduction: Deep-fat frying is a process of cooking foods through immersing them in edible oils at temperatures above the boiling point of water (150-200°C). During this complex unit operation, heat and mass transfer occur simultaneously. During frying, heat is transferred from edible oil to surface of the food and then transferred into it and at the same time, moisture is transferred from inside the food to outside. As a result of these phenomena and by continuing the process, food temperature increases and its moisture content decreases. This, in turn, creates favorable characteristics such as color, texture and taste of the product. Moisture content is one of the important features in the quality of fried products. In the frying process, moisture loss from food occurs by the mechanisms of molecular diffusion, capillary flow and pressure driven flow. The driving force of moisture loss is the partial water vapor pressure difference between the inside and the surface of the food product due to turning the water into vapor. Rate of moisture loss from the food during the frying process decreases exponentially with frying time and increases with increasing temperature. For information about the relationships between various variables during the frying process, moisture loss kinetics modeling can be a suitable step towards improving the quality of fried products. To our knowledge, there has been no study in literature associated with the effect of ultrasound and microwave on moisture loss during deep-fat frying of foods. This study aimed to evaluate the effect of these waves on moisture loss kinetics during frying of potato strips.

Materials and Methods: Potatoes (*Agria variety*) were purchased from a local market and kept in a cold room at 0°C. A mixture of sunflower, soy and cottonseed oil (Behshahr Industrial company), was used for frying potato strips. In this study, effect of ultrasound pretreatment at frequencies of 28 and 40 kHz for 15 min and microwave pretreatment at powers of 3 and 6 W/g for 10 min on moisture content of the fried potato slices at 150, 170 and 190°C for 60, 120, 180 and 240 s was investigated. The moisture content of the samples was measured by drying them in a convection oven at 105°C until the weight was constant. Moisture loss experimental data during frying were fitted with six empirical models proposed in this study as well as the Fick's law of diffusion. The effective moisture diffusion coefficient was calculated based on the Fick's law. To calculate the effect of temperature on the effective moisture diffusion coefficient, the Arrhenius equation was used.

Results and Discussion: By increasing frying temperature, moisture content of the potato slices decreased; however the decrease was not significant at a probability level of 5 percent. The positive effect of oil temperature on moisture loss during deep-fat frying of potato strips has been well documented. This is due to the high kinetic energy of water molecules at higher temperatures, leading to a rapid loss of moisture. The moisture loss by diffusion of water molecules as well as the oil uptake during the frying process lead to the formation of cracks in the structure of the solid food. This, in turn, leads to structural damages and significant changes in terms of structural characteristics including porosity. On the other hand, moisture content of the samples significantly decreased in an exponential manner by increasing the process time. Rapid moisture loss in the first moments of frying is associated with the removal of surface moisture. By decreasing surface moisture over time, the rate of moisture loss was reduced accordingly. Results also showed that both the ultrasound and microwave pretreatments at all the studied levels significantly reduced the final moisture content of the samples at a probability level of 5 percent. The difference between the samples pretreated with two ultrasound frequencies of 28 and 40 kHz was not significant ($P > 0.05$), but with increasing frequency of the pretreatment, the moisture

1- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

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

3- Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(*- Corresponding author: Email: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir)

content decreased to a greater extent. Lower final moisture contents of the samples pretreated with ultrasound were probably due to the creation of microscopic channels in the food structure, which may facilitate moisture loss during frying. On the other hand, application of microwave pretreatment at powers of 3 and 6 watts per gram, decreased initial moisture content of the samples by 38 and 80%, respectively. This resulted in significant ($P < 0.05$) reduction of the final moisture contents of the samples pretreated with microwave. More moisture loss at higher microwave power is probably due to the high intensity of electromagnetic energy as a result of microwave volumetric heating. In addition, the applied models were well fitted to experimental data having high R^2 and low RMSE. The effective moisture diffusion coefficient ranged between 3.57×10^{-8} to $11.08 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Results also demonstrated that the effective moisture diffusion coefficient is increased and the activation energy is decreased by implementing the ultrasound and microwave pretreatments.

Keywords: Kinetics modeling, moisture content, Fried potato strips, Ultrasound, Microwave