نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی/ جلد ۲۶ شماره ۲/ سال ۱۳۹۵

مدل‌سازی تجربی جذب روغن و بررسی تأثیر امواج فراصوت و پوشش خوراکی طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی

طاووس رونقی[۱]، جلال دهقان‌نیا[۲*] و بابک قنبرزاده[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹٤/۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹٤/۱۱/۱۹

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
[۲] به‌ترتیب 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، بررسی میزان و مدل‌سازی جذب روغن طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با غلظت ۰/۱ و ۰/۲٪ کربوکسی‌متیل‌سلولز و امواج فراصوت با فرکانس ٤۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه بود. قطعات سیب‌زمینی با اندازه‌های ٤×۱/۲×۱/۲ سانتی‌متر برش داده شدند و بعد از انجام پیش‌تیمارهای مربوطه در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به مدت ۱، ۲، ۳ و ٤ دقیقه سرخ شدند. پیش‌تیمار پوشش خوراکی در هر دو غلظت و امواج فراصوت با فرکانس ٤۰ کیلوهرتز باعث کاهش جذب روغن شدند و این کاهش‌ها از لحاظ آماری نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار بود. تلفیق این دو پیش‌تیمار نیز باعث کاهش بیشتر جذب روغن نسبت به بقیه نمونه‌ها شد. در این مطالعه، برای مدل‌سازی جذب روغن از تعدادی مدل تجربی پیشنهادی و همچنین دو مدل تجربی موجود در منابع استفاده گردید. میانگین ضریب همبستگی بین نتایج آزمایشی با نتایج حاصل از این مدل‌ها بالا بود. همچنین، با استفاده از رابطه آرنیوس، تأثیر دما بر ماکزیمم جذب و سرعت ویژه جذب روغن بررسی شد. علاوه بر این، آنالیز حسی نمونه‌ها نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار امواج فراصوت و تلفیق آن با پوشش خوراکی، ویژگی‌های حسی سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده را بهبود می‌بخشد.

واژگان کلیدی: سرخ‌کردن عمیق، مدل‌سازی، امواج فراصوت، پوشش خوراکی، جذب روغن

مقدمه

سیب‌زمینی به‌عنوان یکی از گیاهان صنعتی با ارزش غذایی مطلوب و داشتن ۸۲٪- ۷۹ رطوبت، منبع غنی از ویتامین A، اسید آسکوربیک، تیامین، ریبوفلاوین، فسفر، آهن و کلسیم می‌باشد (دوران و همکاران ۲۰۰۷) و به‌همین دلیل مصرف فراوانی در بین مردم جهان دارد؛ به‌طوری‌که سرانه مصرف جهانی آن حدود ۱۰۰ کیلوگرم می‌باشد (فائو ۲۰۱۱). یکی از بهترین روش‌های فرآوری سیب‌زمینی به صورت سنتی و صنعتی، سرخ‌کردن عمیق می‌باشد که به‌طور گسترده در آماده‌سازی بسیاری از مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند شامل سرخ‌کردن ماده غذایی در روغن یا چربی با دمای بالای

نقطه‌جوش آب، معمولاً ۲۰۰C°- ۱۵۰ می‌باشد که منجر به ویژگی‌های مطلوب حسی از لحاظ رنگ، بافت و عطر و طعم در ماده غذایی می‌شود (میربل و همکاران ۲۰۰۹). فرآیند سرخ‌کردن، یک فرآیند انتقال هم‌زمان جرم و حرارت می‌باشد (دتا ۲۰۰۷) که در آن، گرما به‌وسیله همرفت از روغن به سطح ماده غذایی و به‌طریق هدایت از سطح به‌داخل ماده غذایی منتقل می‌شود و به دنبال آن رطوبت نیز از ماده غذایی تبخیر شده و روغن وارد محصول می‌شود (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰). انتقال حرارت باعث دناتوره‌شدن پروتئین، ژلاتینه‌شدن نشاسته، تبخیر رطوبت، تشکیل پوسته و توسعه رنگ در نتیجه واکنش مایلارد و کاراملیزاسیون می‌شود (سینگ ۱۹۹۵). ویژگی‌های حرارتی و فیزیکوشیمیایی ماده غذایی و روغن، شکل ماده غذایی و دمای روغن، فاکتورهای مؤثر روی انتقال جرم و حرارت می‌باشند (موریرا و چن ۱۹۹۷).

مقدار روغن جذب‌شده در طی سرخ‌کردن عمیق یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی مواد غذایی سرخ‌شده می‌باشد. عوامل مختلفی در جذب روغن توسط ماده غذایی دخیل می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به ویژگی‌های خود ماده غذایی (رطوبت، چگالی، اندازه، شکل و سطح محصول)، فاکتورهای فرآیند (دما، زمان و نسبت ماده غذایی به روغن) و شرایط مرحله سردکردن (دما، سرعت سردکردن، تکان‌دادن محصول و خشک‌کردن با کاغذ خشک‌کن) اشاره کرد (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸). ساختار اولیه ماده غذایی، واکنش‌های متقابل مختلف بین ماده غذایی و واسطه حرارتی، تغییر ویژگی‌های روغن و ماده غذایی و واکنش‌های شیمیایی متنوع شامل واکنش بین ترکیبات غذا با چربی‌های اکسیدشده و همچنین هیدرولیز روغن‌های سرخ‌کردنی توسط رطوبت ماده غذایی از جمله فاکتورهایی هستند که روی مقدار روغن جذب‌شده مؤثرند (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸؛ ولاسکو و همکاران ۲۰۰۸).

محتوای روغن بالا در محصولات سرخ‌شده که در بعضی موارد تا یک سوم وزن ماده غذایی می‌رسد، جزو معایب این فرآورده‌ها شمرده می‌شود (میربل و همکاران ۲۰۰۹). مطالعات متعدد نشان داده است که مصرف بیش از حد روغن یکی از عوامل اصلی بروز بیماری‌های قلبی - عروقی و سرطان‌های سینه، روده بزرگ و پروستات، کلسترول خون بالا (آلبرت و میتال ۲۰۰۲)، چاقی (هووارث و همکاران ۲۰۰۵) و دیابت (تانوپولو و همکاران ۲۰۰۳) می‌باشد. به‌منظور دست‌یابی به محصولات سرخ‌شده با محتوای روغن پایین، شناخت مکانیزم‌های موجود طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، به ویژه مکانیسم جذب روغن ضروری می‌باشد. سه مکانیسم اصلی شامل جایگزینی آب[1] تأثیر مرحله سرد-شدن[2] و مواد فعال سطحی[3] (دنا و ساگوی ۲۰۰۶) برای توضیح فرآیند پیچیده جذب روغن پیشنهاد شده است. بوچون و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند که ۳ کسر روغنی مختلف می‌تواند در نتیجه مکانیسم‌های مختلف جذب روغن طی فرآیند سرخ‌کردن شناخته شود:

۱) روغن ساختاری[4] که نشان‌دهنده میزان روغن جذب-شده حین فرآیند سرخ‌کردن می‌باشد.

۲) روغن سطحی نفوذکرده[5] که بیانگر میزان روغن مکیده‌شده به داخل ساختار ماده غذایی سرخ‌شده حین دوره سردکردن (بعد از خارج‌کردن ماده غذایی از داخل سرخ‌کن) می‌باشد.

۳) روغن سطحی[6] که نشان‌دهنده میزان روغن باقیمانده روی سطح محصول سرخ‌شده می‌باشد.

گامبل و همکاران (۱۹۸۷) گزارش کردند زمانی که رطوبت داخلی ماده غذایی تبدیل به بخار می‌شود، یک گرادیان فشار ایجاد می‌شود و هم‌زمان که از سطح ماده غذایی نیز رطوبت خارج می‌شود، روغن چسبیده به

[1] Water replacement
[2] Cooling-phase effect
[3] Surface-active agents
[4] Structure oil
[5] Penetrated surface oil
[6] Surface oil

سطح از محل‌های آسیب دیده وارد غذا می‌شود. این پژوهش‌گران احتمال دادند که بیشترین میزان روغن، حین مرحله سردکردن ماده غذایی و در اثر کندانس‌شدن بخار وارد آن می‌شود. همچنین، متز (۱۹۹۳) گزارش کرد که اگر ماده غذایی در حالی‌که دمای آن هنوز بالاست، از داخل روغن خارج شود، فقط ٪۱۵ روغن چسبیده به آن جذب می‌شود. پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که جذب روغن، اساساً یک پدیده سطحی بوده و بیشترین میزان جذب آن طی مرحله سردکردن رخ می‌دهد (اوفهیل و اشر، ۱۹۹٦؛ موریرا و همکاران ۱۹۹۷؛ موریرا و باروفت، ۱۹۹۸؛ آگویلرا و گلوریا-هرناندز ۲۰۰۰).

در دهه‌های اخیر در بسیاری از پروژه‌های پژوهشی تلاش شده است راه‌کارها و فرآیندهای مکمل متعددی با هدف کاهش محتوای روغن در عین حفظ کیفیت حسی پیشنهاد شود (ملما ۲۰۰۳). از جمله این فرآیندها می‌توان به استفاده از پیش‌تیمارهایی مثل پیش‌خشک‌کردن (لامبرگ و همکاران ۲۰۰۲؛ مویانو و همکاران ۲۰۰۲)، انجماد (کوک و همکاران ۱۹۹۵)، آنزیم‌بری (موریرا و همکاران ۱۹۹۹)، آبگیری اسمزی[7] (مویانو و همکاران ۲۰۰۲؛ بانگر و همکاران ۲۰۰۳)، پوشش‌های خوراکی (ملما ۲۰۰۳) و سرخ‌کردن تحت خلأ که علاوه بر کاهش جذب روغن، باعث بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای و حسی ماده غذایی می‌شوند (گارایو و موریرا ۲۰۰۲؛ میربل و همکاران ۲۰۰۹)، اشاره کرد.

پوشش‌های خوراکی پلی‌ساکاریدی که کربوکسی‌متیل-سلولز نیز از این گروه می‌باشد، شدیداً آب‌دوست بوده و محافظ ضعیفی در مقابل رطوبت می‌باشند؛ ولی محافظ خوبی در مقابل چربی هستند (بورتوم ۲۰۰۸). کاهش جذب روغن و خروج رطوبت توسط پوشش کربوکسی-متیل‌سلولز، به تشکیل یک لایه محافظ روی نمونه غذایی در مراحل اولیه سرخ‌کردن در اثر ژلاتینه‌شدن دمایی در دماهای بالای ٦٠C° نسبت داده می‌شود (گارسیا و همکاران ۲۰۰۲) که این لایه محافظ باعث بالارفتن کشش سطحی ماده غذایی شده و اثر تر کنندگی[8] روغن را کاهش می‌دهد (میل ترکیبی یک مایع با یک جامد را اثر تر کنندگی می‌گویند). علاوه بر این، بر خلاف یک‌سری از پیش‌تیمارها، در استفاده از پوشش خوراکی به عنوان پیش‌تیمار فرآیند سرخ‌کردن مواد غذایی، نیازی به تغییر در طراحی تجهیزات وجود نخواهد داشت (باجاج و سینگهال ۲۰۰۷) که این مسأله از محسنات کاربرد این مواد در نظر گرفته می‌شود. همچنین، با توجه به این‌که ویژگی‌های سطحی ماده غذایی مهمترین عامل در جذب روغن طی سرخ‌کردن می‌باشد (ملما ۲۰۰۳)، هر نوع تغییری در ساختار سطح، جذب روغن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال، آناپیور (۱۹۹۹) با استفاده از غلظت ۲-۰/۲۵ درصد کربوکسی‌متیل‌سلولز، کاهش ۹/۸-۳ درصدی را در جذب روغن در غذاهای سرخ‌شده گزارش کردند.

علاوه بر پیش‌تیمارهای مذکور، طی دهه‌های اخیر استفاده از امواج فراصوت[9] در فرآیندهای صنایع غذایی با هدف بهینه‌سازی فرآیند و بهبود کیفیت ماده غذایی مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات مختلفی در زمینه استفاده از پیش‌تیمار امواج فراصوت در فرآیند خشک-کردن انجام گرفته است (فرناندز و رودریگوئز، ۲۰۰۷؛ فرناندز و همکاران ۲۰۰۹؛ گارسیا-نوگوئرا ۲۰۱۰). نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که استفاده از این پیش‌تیمار موجب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش چروکیدگی و بهبود ویژگی‌های ظاهری و حسی ماده خشک‌شده می‌گردد. دلیل این امر به شکل‌گیری کانال‌های میکروسکوپی در ماده غذایی در اثر انقباض و انبساط‌های متوالی ایجادشده توسط امواج فراصوت نسبت داده می‌شود که باعث ایجاد حالت اسفنجی و تسهیل خروج رطوبت از ماده غذایی می‌گردد (فرناندز و همکاران ۲۰۰۹). انتظار می‌رود با توجه به شباهت فرآیند

[7] Osmotic dehydration

[8] Wetting effect

[9] Ultrasound

سرخ‌کردن با خشک‌کردن از نظر انتقال جرم (فرید و کیزیلل ۲۰۰۹)، استفاده از امواج فراصوت در فرآیند سرخ‌کردن از طریق افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش زمان فرآیند و در نتیجه کاهش جذب روغن را در پی داشته باشد.

همچنین، ویژگی‌های فیزیکی محصول مانند چگالی، تخلخل و چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن دست‌خوش تغییراتی می‌شوند که می‌تواند روی پدیده انتقال جرم و قابلیت پذیرش محصول نهایی تأثیر داشته باشد. مطالعات مختلف نشان داده است که محتوای رطوبت اولیه بالاتر در نهایت منجر به افزایش میزان روغن جذب‌شده می‌گردد. با توجه به وجود رابطه بین چگالی و محتوای رطوبت، انتظار می‌رود ماده غذایی با چگالی اولیه بالا جذب روغن کمتری طی فرآیند سرخ‌کردن داشته باشد (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸). از طرف دیگر، تخلخل شکل‌گرفته در محصول حین سرخ‌کردن، نقش مهمی در جذب بعدی روغن بازی می‌کند (ساگوی و همکاران ۱۹۹۷). رابطه خطی مستقیم بین میزان جذب روغن و تخلخل شکل‌گرفته در محصول سرخ‌شده توسط پژوهش‌گران مختلف ارائه شده است (پینتهوس و همکاران ۱۹۹۵؛ موریرا و باروفت ۱۹۹۸). با توجه به وجود رابطه بین تخلخل و چگالی ظاهری می‌توان با اندازه‌گیری چگالی ظاهری به میزان تخلخل محصول پی برد. از طرف دیگر، چروکیدگی علاوه بر تأثیر منفی روی ظاهر محصول، انتقال رطوبت در داخل بافت ماده غذایی را نیز با مشکل مواجه می‌سازد (ترونکوزو و پدرسچی ۲۰۰۹). با استفاده از این ویژگی‌های فیزیکی، می‌توان تأثیر استفاده از پیش‌تیمارها روی ویژگی‌های کمی و کیفی محصول را ارزیابی نمود.

به‌منظور کنترل کیفیت محصولات سرخ‌شده، فهم فرآیند پیچیده‌ای که طی فرآوری این محصولات اتفاق می‌افتد، از اهمیت خاصی برخوردار است. برای درک بهتر روند فرآیند سرخ‌کردن و بهینه‌سازی آن برای کاربردهای صنعتی، مدل‌سازی ریاضی جذب روغن ضروری است. مدل‌سازی جذب روغن، روابط بین متغیرهای میزان جذب روغن و زمان را نشان می‌دهد. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی میزان جذب روغن طی فرآیند سرخ‌کردن می‌باشند (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰؛ مویانو و پدرسچی ۲۰۰۶). بعد از اعتبارسنجی و ارزیابی مدل نیز، بدون نیاز به انجام آزمایش‌های بعدی، می‌توان از آن برای موارد مشابه استفاده کرد.

تاکنون و بر اساس اطلاعات موجود، در زمینه تأثیر هم-زمان امواج فراصوت و پوشش خوراکی روی جذب روغن مطالعه‌ای صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی جذب روغن طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت و پوشش خوراکی کربوکسی‌متیل‌سلولز به‌منظور کنترل بهینه فرآیند، بررسی تأثیر این پیش‌تیمارها روی میزان جذب روغن و همچنین بررسی تأثیر مقدار رطوبت، چروکیدگی و چگالی ظاهری روی جذب روغن بود.

مواد و روش‌ها

مواد

مواد خام مورد استفاده در این پژوهش، سیب‌زمینی و روغن مایع بود. سیب‌زمینی از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایش‌ها در سردخانه بالای صفر نگهداری شد و روغن مورد استفاده در این مطالعه، روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی (مخلوطی از روغن-های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه) بود. همچنین، برای پوشش‌دادن نمونه‌ها از کربوکسی‌متیل‌سلولز با ویسکوزیته پایین و میانگین وزن ملکولی ۹۰ kDa (سانروس، ساخت ژاپن) استفاده شد.

تجهیزات

سرخ‌کن مورد استفاده در این پژوهش، سرخ‌کن خانگی (Mulinex، مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰C°، دارای محفظه ضدزنگ و سبد جداشونده)، آون کنوکسیونی (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری،

ساخت ایران، شرکت فن‌آزماگستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) جهت اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌ها و حمام امواج فراصوت (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان فرآیند) برای اولتراسونیکاسیون استفاده شد.

آماده سازی محلول پوشش‌خوراکی

برای تهیه محلول کربوکسی‌متیل‌سلولز با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۲ درصد، ابتدا بشر حاوی مقدار مشخصی آب مقطر روی هیتر قرار گرفته و تا رسیدن به دمای حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. سپس، مقدار مشخصی کربوکسی‌متیل‌سلولز با توجه به غلظت مورد نیاز در چند نوبت و در فواصل زمانی مشخص به بشر اضافه شد و هم‌زمان عمل هم‌زدن توسط مگنت صورت گرفت. بعد از حل‌شدن تمام کربوکسی‌متیل‌سلولز در آب پس از حدود ۱۰ دقیقه، محلول به‌دست‌آمده به‌وسیله حمام آب خنک گردید (قنبرزاده و همکاران ۲۰۱۰).

آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از شستشو و پوست‌گیری سیب‌زمینی، برای تهیه نمونه‌ها با ابعاد ٤×۱/۲×۱/۲ سانتی‌متر، از یک کاتر دستی استفاده شد. سپس، نمونه‌های مکعب مستطیلی شکل، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند و رطوبت اضافی با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. در مرحله بعد، نمونه‌های پیش‌تیمارشده به‌صورت جدول ۱ تهیه شدند.

شرایط سرخ‌کردن

برای سرخ‌کردن سیب‌زمینی‌ها از سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰C° به مدت ۱، ۲، ۳ و ٤ دقیقه استفاده شد. جهت سرخ‌کردن نمونه‌ها، ابتدا سرخ‌کن تا خط نشانه پر از روغن گردید و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن موردنظر، سرخ‌کن روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ سپس حدود ۵۰-٤۰ گرم نمونه (۸-۷ قطعه) داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار گرفت و با رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای موردنظر، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور اتوماتیک داخل روغن غوطه‌ور گردید. پس از سرخ‌شدن به‌مدت زمان موردنظر، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور خودکار از سرخ‌کن بیرون آمده و با آژیر سرخ‌کن، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شدند و سپس روغن اضافی آن‌ها توسط یک کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه روی آن‌ها انجام گردید. روغن مورد استفاده پس از هر هشت بار فرآیند سرخ‌کردن، تعویض شد. تمامی آزمایش‌ها با دو تکرار انجام شد و داده‌های گزارش‌شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

اندازه‌گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت با خشک‌کردن نمونه‌ها در آون کنوکسیونی با دمای ۱±۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری شد (AOAC، ۱۹۹۵؛ روش ۹۳٤/۰٦) و بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید.

اندازه‌گیری محتوای روغن

محتوای روغن نمونه‌های سرخ‌شده با استخراج روغن آن‌ها توسط حلال پترولیوم‌اتر در دستگاه سوکسله اندازه‌گیری گردید (AOAC، ۱۹۹۵؛ روش ۹٤۵/۱٦) و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

اندازه‌گیری میزان چروکیدگی

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

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

ردیف	تیمار	علامت اختصاری
۱	شاهد	Control
۲	پوشش‌دادن با محلول ٪۰/۱ کربوکسی‌متیل‌سلولز	0.1CMC
۳	پوشش‌دادن با محلول ٪۰/۲ کربوکسی‌متیل‌سلولز	0.2CMC
٤	امواج فراصوت با فرکانس ٤۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه	U
٥	امواج فراصوت با فرکانس ٤۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه-پوشش‌دادن با محلول ٪۰/۱ کربوکسی-متیل‌سلولز	U-0.1CMC
٦	امواج فراصوت با فرکانس ٤۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه-پوشش‌دادن با محلول ٪۰/۲ کربوکسی-متیل‌سلولز	U-0.2CMC

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

۲ و ۳: نمونه‌هایی که به‌منظور پوشش‌دادن، در محلول‌های ۰/۱ و ٪۰/۲ تهیه‌شده از کربوکسی‌متیل‌سلولز، به مدت ٥ ثانیه به‌طور مجزا غوطه‌ور شدند.

٤: نمونه‌هایی که جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در حمام امواج فراصوت در زیر یک صفحه شیشه‌ای در معرض فرکانس ٤۰ کیلوهرتز به‌مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند.

٥ و ٦: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار تلفیقی از امواج فراصوت و پوشش خوراکی، ابتدا در حمام امواج فراصوت در زیر یک صفحه شیشه‌ای با فرکانس ٤۰ کیلوهرتز به‌مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و سپس به‌طور مجزا در محلول‌های ۰/۱ و ٪۰/۲ از پوشش خوراکی به مدت ٥ ثانیه غوطه‌ور شدند.

اندازه‌گیری چگالی ظاهری

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

مدل‌سازی جذب روغن

برای پیش‌بینی میزان جذب روغن و کنترل آن می‌توان از مدل‌سازی تجربی استفاده کرد. در این پژوهش، از یک مدل تجربی که توسط مویانو و پدرچی (۲۰۰٦) پیشنهاد شده است، استفاده شد (رابطه ۱):

$$Y = \frac{Y_{max} K_Y t}{1 + K_Y t} \qquad [۱]$$

Y: مقدار جذب روغن در زمان t (g oil/g dry basis, oil free)

t: زمان سرخ‌کردن (s)

Y_{max}: مقدار روغن در لحظه تعادل یا مقدار ماکزیمم روغن در $t=\infty$ (g oil/g dry basis, oil free)

K_Y: سرعت ویژه جذب روغن (s^{-1})

داده‌های تجربی محتوای روغن بر حسب تابعی از زمان، توسط نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.635, R2011a) برازش شد و مقدار ماکزیمم جذب روغن و سرعت ویژه جذب روغن با استفاده از مدل فوق محاسبه گردید. این برازش با استفاده از ابزار Curve fitting این نرم‌افزار انجام شد؛ به این صورت که ابتدا منحنی جذب روغن رسم شده و سپس توسط رگرسیون غیرخطی، دو ضریب مدل (Y_{max} و K_Y) به صورت هم‌زمان محاسبه شدند. علاوه بر مدل فوق، مدل‌سازی جذب روغن در قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، به‌صورت تابعی از زمان، خروج رطوبت، چروکیدگی و چگالی ظاهری نیز با استفاده از چند مدل پیشنهادی

صورت گرفت. مدل‌های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به دست آمد. ارزیابی مدل‌ها نیز با استفاده از دو معیار ضریب همبستگی (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.

تأثیر دما روی Y_{max} و K_Y

تأثیر دما روی مقدار روغن در لحظه تعادل و سرعت ویژه جذب روغن، توسط رابطه از نوع آرنیوس (رابطه ۲ و ۳) بررسی شد (ترونکوزو و پدرسچی ۲۰۰۹):

$$Y_{max} = Y_0 \exp(-E_a/RT) \qquad [۲]$$

$$K_Y = K_{Y_0} \exp(-E_a/RT) \qquad [۳]$$

Y_0 و K_{Y0}: پیش‌فاکتورهای نمایی

E_a: انرژی فعال‌سازی (J/mol)

R: ثابت جهانی گازها (۸/۳۰۹ J/mol K)

T: دما (K)

لگاریتم روغن تعادلی و سرعت ویژه جذب روغن، به‌صورت تابعی از عکس دمای مطلق، یک رابطه خطی را نشان می‌دهد که از حاصل‌ضرب شیب این خط در ثابت جهانی گازها، انرژی فعال‌سازی برای هر فاکتور به‌دست می‌آید.

ارزیابی حسی

ارزیابی حسی نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۱۹۰C° به‌مدت ٤ دقیقه، توسط ۱۰ ارزیاب آموزش ندیده[0] انجام شد. نمونه‌ها بعد از سرخ‌شدن و دادن کد، به‌طور تصادفی توسط ارزیاب‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. ویژگی‌های حسی مورد ارزیابی و الگوی امتیازدهی شامل رنگ (زرد تیره: ۱؛ زرد روشن: ۵)، بافت (خیلی نرم: ۱؛ ترد: ۵)، طعم و مزه (طعم و مزه روغنی بسیار زیاد: ۱؛ بسیار کم: ۵)، شکل ظاهری (چروکیدگی خیلی زیاد: ۱؛ چروکیدگی خیلی کم: ۵)، بو (بوی روغنی خیلی زیاد:۱ بوی روغنی خیلی کم: ۵) و ارزیابی کلی (بر اساس فاکتورهای ذکرشده) بود.

[0] Untrained panelists

آنالیز آماری

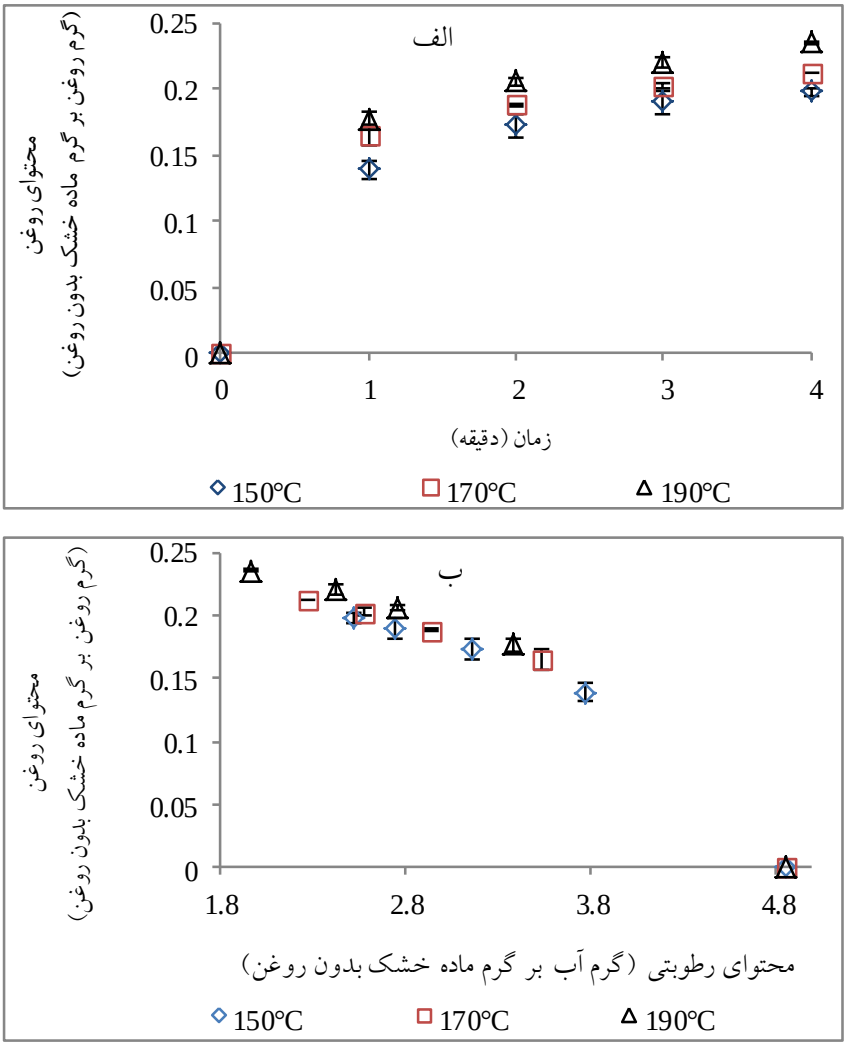
در این مطالعه، ٦ تیمار نشان‌داده‌شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰C° و ٤ زمان ۱، ۲، ۳ و ٤ دقیقه در دو تکرار (۱٤٤=۲×٤×۳×٦) سرخ شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. همچنین، برای انجام مقایسه میانگین، از آزمون بونفرونی[1](استیل و همکاران ۱۹۹۷) در سطح احتمال ٪۵ (P<۰/۰۵) استفاده شد.

[1] Bonferroni

نتایج و بحث

جذب روغن

شکل ۱- الف، محتوای روغن نمونه‌های شاهد سرخ‌شده را بر حسب تابعی از زمان در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰C° نشان می‌دهد. با پیشرفت زمان، محتوای روغن در تمامی دماها افزایش یافت. آهنگ جذب روغن در فواصل زمانی اولیه رفتار نمایی نشان داد و رفته رفته با گذشت زمان، سرعت جذب، کاهش یافته و به سمت حالت تعادلی پیش رفت. در بررسی تأثیر دما بر جذب روغن، در منحنی جذب روغن به‌صورت تابعی از زمان (شکل۱- الف)، مشاهده می‌شود که دماهای بالای سرخ‌کردن، باعث افزایش جذب روغن در زمان‌های یکسان گردید.

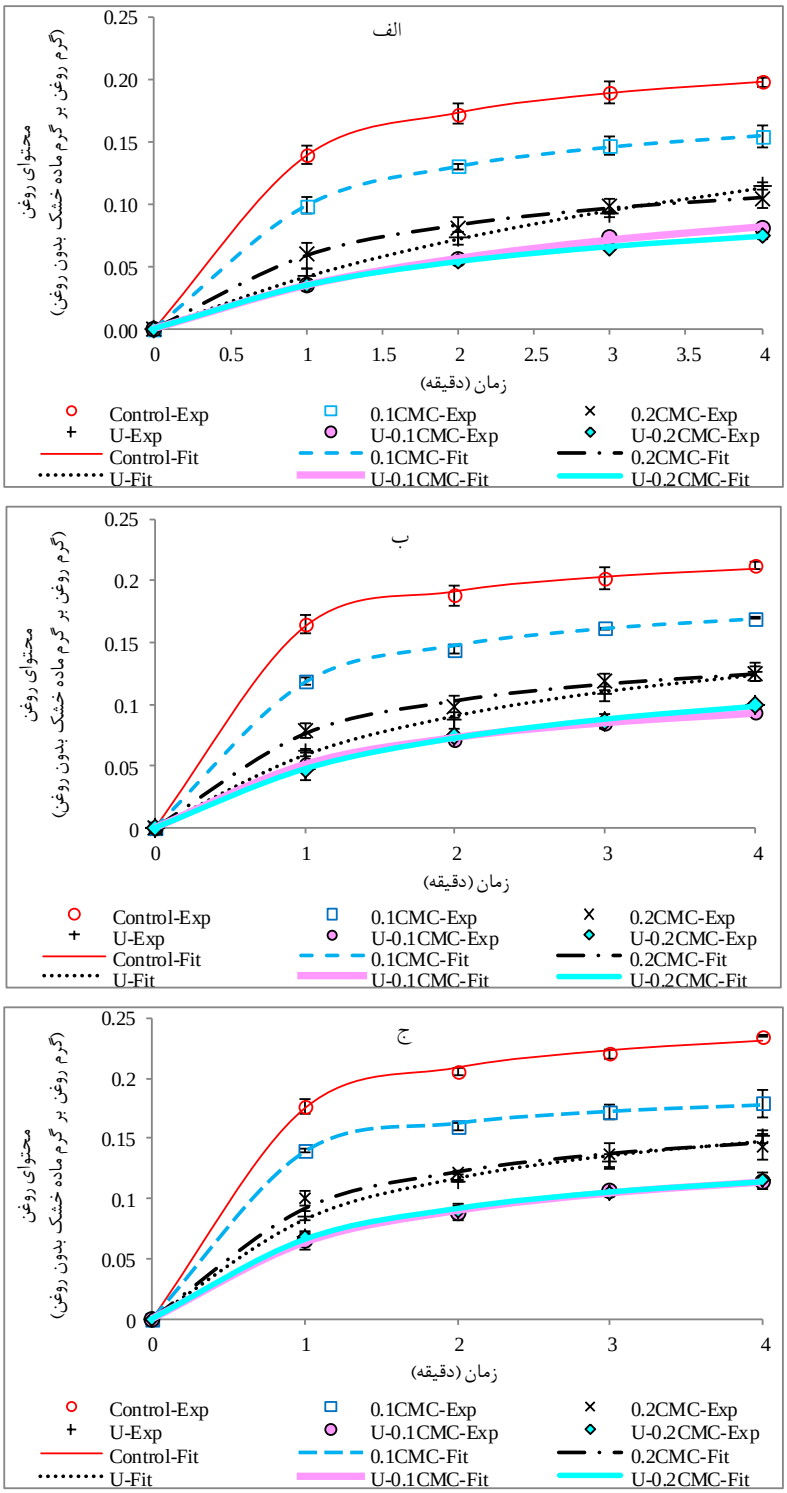


شکل ۱- محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده به صورت: الف) تابعی از زمان برای نمونه شاهد در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C، ب) تابعی از محتوای رطوبت برای نمونه شاهد در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C

این یافته، با یافته‌های کروکیدا و همکاران (۲۰۰۰)، ویتراک و همکاران (۲۰۰۲) و مت و همکاران (۲۰۰٤) مطابقت دارد. تأثیر دمای بالا را می‌توان به اثر جایگزینی آب نسبت داد (دنا و ساگوی ۲۰۰٦). به‌دلیل این‌که در دماهای بالا در زمان سرخ‌کردن یکسان، مقدار رطوبت بیشتری خارج می‌شود، در نهایت روغن بیشتری جذب ماده غذایی می‌گردد (گمبل و رایس ۱۹۸۷؛ موریرا و همکاران ۱۹۹۷). به‌علاوه، دماهای بالای سرخ‌کردن، باعث اکسیداسیون، هیدرولیز و در نتیجه افزایش تشکیل ترکیبات فعال سطحی و قطبی مثل مونوگلیسرید، دی-گلیسرید، اسیدهای چرب آزاد و گلیسرول می‌شود (بلومنتال و استیر، ۱۹۹۱؛ بلومنتال، ۱۹۹۱؛ دنا و ساگوی ۲۰۰٦) که این ترکیبات از طریق کاهش کشش سطحی، باعث افزایش جذب روغن می‌شوند. در مورد تأثیر دما روی جذب روغن نتایج متناقضی گزارش شده است. به-عنوان مثال، ترونکوزو و پدرسچی (۲۰۰۹) گزارش کردند که افزایش دما، جذب روغن را در بازه زمانی ۸-۱ دقیقه کاهش می‌دهد. این پژوهش‌گران دلیل این امر را به تشکیل پوسته و تخلخل کمتر آن در دماهای بالا نسبت دادند. با وجود این، با مقایسه محتوای روغن در دماهای مختلف در بازه زمانی ٤-۱ دقیقه در این پژوهش، دماهای بالاتر جذب روغن بیشتری داشتند. شکل ۱- ب،

محتوای روغن نمونه‌های شاهد را به صورت تابعی از محتوای رطوبت در سه دمای مختلف نشان می‌دهد. با کاهش محتوای رطوبت، جذب روغن در هر سه دما افزایش پیدا کرد. این تأثیر با مکانیسم جایگزینی آب توسط روغن توجیه می‌شود (دنا و ساگوی ۲۰۰٦). این نتیجه نیز مشابه نتیجه به‌دست‌آمده توسط مویانو و پدرچی (۲۰۰٦) می‌باشد. روند جذب روغن بر حسب زمان و محتوای رطوبت در پیش‌تیمارهای دیگر نیز به همین منوال بود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).

شکل ۲ (الف، ب، ج)، تغییرات محتوای روغن را به‌صورت تابعی از زمان به مدت ٤-۱ دقیقه، در تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱ و سپس سرخ‌شده در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C نشان می‌دهد. منحنی‌ها در دقایق اولیه حالت صعودی داشته و با نزدیک‌شدن به مراحل انتهایی فرآیند به حالت تعادلی نزدیک شدند. مطابق این شکل، با افزایش زمان سرخ‌کردن، محتوای روغن در تمامی پیش-تیمارها، افزایش پیدا کرد و نمونه‌های شاهد در مقایسه با دیگر پیش‌تیمارها بیشترین میزان جذب روغن را در زمان‌های سرخ‌کردن یکسان از خود نشان دادند. کمترین میزان جذب روغن نیز مربوط به پیش‌تیمار امواج فراصوت - پوشش خوراکی ٪۰/۲ بود و بعد از آن به-ترتیب پیش‌تیمار امواج فراصوت - پوشش خوراکی ٪۰/۱، امواج فراصوت، پوشش خوراکی ٪۰/۲ و پوشش خوراکی ٪۰/۱ کمترین میزان جذب روغن را داشتند. کاهش محتوای روغن در نمونه‌های پیش‌تیمارشده با پوشش خوراکی و سپس سرخ‌شده در دمای ۱۵۰°C با نتایج به‌دست‌آمده توسط ویلیامز و میتال (۱۹۹۹)، گارسیا و همکاران (۲۰۰۲) و سوارز و همکاران (۲۰۰۸) همخوانی دارد. این مسأله را می‌توان به خاصیت ترموژلی مشتقات سلولز نسبت داد. این ترکیبات از طریق تشکیل فیلم در دماهای بالای دمای ژله‌ای‌شدن (حول و حوش دمای سرخ‌کردن)، جذب روغن را کاهش می‌دهند (گارسیا و همکاران ۲۰۰۲). مطابق شکل ۲- ج، کاهش جذب روغن در نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت نسبت به نمونه شاهد را می‌توان به کاهش روغن ساختاری نسبت داد. در واقع، بر طبق مکانیزم جذب روغن، علیرغم جذب بیشترین مقدار روغن از کل محتوای روغن محصول طی مرحله سردشدن، بخشی از کل روغن جذب‌شده، حین انجام فرآیند توسط محصول جذب می‌شود (روغن ساختاری). بنابراین، در رابطه با کاهش محتوای روغن نمونه توسط پیش‌تیمار امواج فراصوت، حین سرخ‌کردن در دمای ۱۵۰°C، می‌توان بیان کرد که به‌دلیل وجود کانال‌های میکروسکوپی حاصل از انجام پیش‌تیمار، خروج رطوبت حین سرخ‌کردن، با شدت بیشتری انجام شده و فشار بخار بیشتری نسبت به نمونه شاهد سرخ‌شده در شرایط یکسان از لحاظ دما و زمان در اطراف ماده غذایی ایجاد می‌شود که باعث کاهش جذب روغن حین فرآیند گردیده و در نهایت منجر به کاهش کل میزان روغن جذب‌شده توسط محصول می‌شود. عامل دیگری که می‌توان برای کاهش جذب روغن توسط امواج فراصوت بیان کرد این است که به-دلیل محاسبه میزان روغن در ماده خشک بدون روغن، در وزن یکسان از نمونه شاهد و نمونه پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت، به‌دلیل خروج رطوبت بیشتر نمونه پیش-تیمارشده با امواج فراصوت در مقایسه با نمونه شاهد، مقدار ماده خشک نمونه امواج فراصوت، بیشتر از ماده خشک شاهد بوده و جذب روغن کمتری نشان خواهد داد.



شکل ۲- تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش‌شده (Fit) با مدل تجربی مویانو-پدرسچی (۲۰۰۶) حین سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵۰ (الف)، ۱۷۰ (ب) و ۱۹۰°C (ج) در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

جدول ۲- مقایسه میانگین مربعات جذب روغن برای پارامترهای مورد استفاده: الف: زمان سرخ‌کردن؛ ب: دمای سرخ‌کردن؛ ج: غلظت CMC؛ د: فرکانس امواج فراصوت

الف:

زمان سرخ‌کردن (دقیقه)	۱	۲	۳	٤
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن)*	۰/۰۸۷۱[b]	۰/۱۱۱٤[ab]	۰/۱۲۷۵[a]	۰/۱۳۸۳[a]

*حروف لاتین متفاوت، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد. خطای میانگین مربعات (Error Mean Square) نیز برابر ۰/۰۰۰۳ بود.

ب:

دمای سرخ‌کردن (درجه سانتیگراد)	۱۵۰	۱۷۰	۱۹۰
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن)*	۰/۰۹۸۵[b]	۰/۱۱۵٦[ab]	۰/۱۳٤۱[a]

*حروف لاتین متفاوت، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد. خطای میانگین مربعات (Error Mean Square) نیز برابر ۰/۰۰۰۳ بود.

ج:

غلظت CMC (درصد)	۰	۰/۱	۰/۲
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن)*	۰/۱٤٥٤[a]	۰/۱۱۲۲[b]	۰/۰۹۰٦[c]

*حروف لاتین متفاوت، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد. خطای میانگین مربعات (Error Mean Square) نیز برابر ۰/۰۰۰۳ بود.

د:

فرکانس امواج فراصوت (کیلوهرتز)	۰	٤۰
محتوای روغن (گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن)*	۰/۱٤۸۳[a]	۰/۰۸۳۸[b]

*حروف لاتین متفاوت، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد. خطای میانگین مربعات (Error Mean Square) نیز برابر ۰/۰۰۰۳ بود.

بدیهی است که تلفیق دو پیش‌تیمار پوشش خوراکی و امواج فراصوت به‌منظور کاهش جذب روغن، تأثیر بیشتری از هرکدام از پیش‌تیمارها به تنهایی خواهد داشت. روند تغییرات دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰°C نیز مشابه دمای ۱۵۰°C بود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). جدول ۲، مقایسه میانگین مقادیر روغن جذب‌شده را به ترتیب برای ٤ زمان، ۳ دما، ۲ غلظت کربوکسی‌متیل‌سلولز و ۱ فرکانس امواج فراصوت نشان می‌دهد.

مدل‌سازی جذب روغن

جدول ۳، پارامترهای حاصل از برازش داده‌های تجربی محتوای روغن در ٤ زمان ۱، ۲، ۳ و ٤ دقیقه را با مدل مویانو و پدرسچی (رابطه ۱) برای تیمارهای مورد مطالعه طبق جدول ۱ در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C نشان می دهد. مطابق این جدول، افزایش دما در تمامی پیش‌تیمارها باعث افزایش ماکزیمم جذب (Y_{max}) و سرعت ویژه جذب روغن (K_Y) شده است؛ ولی تأثیر دما روی این دو فاکتور از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. این نتیجه با یافته‌های آلوارز و همکاران (۲۰۰۰) و گوپتا و همکاران (۲۰۰۰) مطابقت دارد. در بین پیش‌تیمارها، بیشترین Y_{max} در بین همه دماها، مربوط به نمونه شاهد و کمترین Y_{max} متعلق به پیش‌تیمار امواج فراصوت - کربوکسی‌متیل‌سلولز ٪۰/۲ بود.

جدول ۳- پارامترهای حاصل از مدل تجربی مویانو – پدرسچی (۲۰۰۶) برای مدل‌سازی جذب روغن مطابق جدول ۱

تیمار	دما (°C)											
	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	Y_{MAX}	K_Y	R^2	RMSE $\times 10^{-3}$	Y_{MAX}	K_Y	R^2	RMSE $\times 10^{-3}$	Y_{MAX}	K_Y	R^2	RMSE $\times 10^{-3}$
Control	۰/۲۳۱^{bc}	۱/٤۹۸^{d}	/۹۹۰	۰/۷۸	۰/۲٤۰^{ab}	۲/۳۵۹^{b}	/۹۹۰	۲/٦۰	۰/۲۵۹^{a}	۲/۷۰^{a}	/۹۹۰	۳/۳٦
0.1CMC	۰/۱۹۱^{d}	۱/۰٦۷^{e}	/۹۹۰	۰/۸۱	۰/۱۹۸^{d}	۱/٤٦۸^{d}	/۹۹۰	۲/۱٤	۰/۲۱۰^{dc}	۲/۰۳^{c}	/۹۹۰	۱/۷۲
0.2CMC	۰/۱٤^{efgh}	۰/٦۹۳^{f}	/۹۹۰	۲/۳۰	۰/۱۵۰^{efg}	۰/۹۳۰^{e}	/۹۹۰	۳/۳٤	۰/۱۵۵^{ef}	۱/۰۰^{e}	/۹۹۰	۵/٤۵
U	۰/۱۹۰^{d}	۰/۱۸٦^{h}	/۹۹۰	۱/٤۳	۰/۱۹۵^{d}	۰/٤۳۳^{g}	/۹۹۰	۳/۵۵	۰/۲۰۰^{d}	۰/۷۰۱^{f}	/۹۹۰	۳/۹۱
U-0.1CMC	۰/۱۵^{efg}	۰/۳۰۳^{gh}	/۹۹۰	۱/۳۷	۰/۱۵۷^{e}	۰/٦۷۷^{f}	/۹۹۰	۱/۵٦	۰/۱٦۱^{e}	۰/۷۰۳^{f}	/۹۹۰	۱/٤۰
U-0.2CMC	۰/۱۱۹^{h}	۰/٤۱۱^{g}	/۹۹۰	۱/۳٦	۰/۱۲۲^{gh}	۰/٤۵۸^{g}	/۹۹۰	۱/٤۲	۰/۱۳۰^{fgh}	۰/۷۰٤^{f}	/۹۹۰	۱/۷۷

جدول ۴- مدل‌سازی میزان جذب روغن (Y) به صورت تابعی از زمان (t)، محتوای رطوبت بدون بعد (M_t)، چروکیدگی (S) و چگالی ظاهری (ρ)

ردیف	مدل	مرجع
۱	$o = o_{eq}^{1}(1-\exp(-K^{1}t))$	مویانو و پدرسچی (۲۰۰٦)
۲	$Y = \exp(at) - \exp(bt)$	پژوهش حاضر
۳	$Y = a + \exp(bt^{1/2})$	پژوهش حاضر
۴	$Y = t/(a + bt)$	پژوهش حاضر
۵	$Y = t^{2}/(1 + at^{b})$	پژوهش حاضر
۶	$Y = a\exp(bM_t)$	پژوهش حاضر
۷	$Y = \exp(aS) - 1$	پژوهش حاضر
۸	$Y = a\rho^{2} + b\rho + c$	پژوهش حاضر

همچنین، نمونه شاهد، بیشترین K_Y را نشان داد و کمترین K_Y را امواج فراصوت دارا بود.

جدول ٤، مدل مویانو و پدرچی (۲۰۰٦) (رابطه ۱) به همراه مدل‌های پیشنهادی این تحقیق، برای مدل‌سازی جذب روغن را نشان می‌دهد که در آن‌ها، جذب روغن به‌صورت تابعی از زمان، محتوای رطوبت بدون بعد، چروکیدگی و چگالی ظاهری مدل‌سازی شده است. جدول ۵ نیز پارامترهای آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ۸-۱ جدول ٤ را نشان می‌دهد. تمامی مدل‌های پیشنهادی با داشتن پارامترهای آماری مناسب (R^2 بالا و RMSE پایین)، داده‌های آزمایشی را به خوبی برازش نمودند. به عنوان مثال، شکل ۳- الف،

برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن نمونه شاهد سرخ‌شده در دمای ۱۵۰°C را به صورت تابعی از زمان با مدل پیشنهادی ٤ نشان می‌دهد.

جدول ۵- پارامترهای به‌دست‌آمده از مدل‌سازی جذب روغن برای مدل‌های پیشنهادی ۸-۱

مدل ۱	دما (°C)											
تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	O_{eq}^{1}	K^1	R^2	RMSE ×10^{-3}	O_{eq}^{1}	K^1	R^2	RMSE ×10^{-3}	O_{eq}^{1}	K^1	R^2	RMSE ×10^{-3}
Control	۰/۱۹٦	۱/۱۷۸	۰/۹۹	٤/۱	۰/۲۱	۱/۵۱۸	۰/۹۹	٦/٤۳	۰/۲۲۷	۱/٤۲۲	۰/۹۹	۷/۵
0.1CMC	۰/۱۵٦	۰/۹٦۵	۰/۹۹	۲/٤٤	۰/۱٦۷	۱/۱٦۲	۰/۹۹	۵/۲	۰/۱۷٤	۱/۵٤	۰/۹۹	٤/۹
0.2CMC	۰/۱۱	۰/۷۳۱	۰/۹۹	۳/۰٤	۰/۱۲۷	۰/۸۷۷	۰/۹۹	٤/۹	۰/۱٤۱	۱/۱٦۱	۰/۹۹	٤/۵
U	۰/۱٦٦	۰/۲۸۳	۰/۹۹	۱/۷۲	۰/۱٤	۰/۵۲٤	۰/۹۹	٤/۷	۰/۱۵٤	۰/۷۳۲	۰/۹۹	۵/۹
U-0.1CMC	۰/۱	۰/٤۱۸	۰/۹۹	۱/۰۳	۰/۱۱۷	۰/۷۱۸	۰/۹۹	۲/۸	۰/۱۲۹	۰/۷۳۹	۰/۹۹	۲/٦
U-0.2CMC	۰/۰۸٤	۰/۵۱۱	۰/۹۹	۱/۹۵	۰/۱۱	۰/۵۵۷	۰/۹۹	۱/۹	۰/۱۱۷	۰/۷۸۹	۰/۹۹	۳/٤

مدل ۲	دما (°C)											
تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	R^2	RMSE ×10^{-3}
Control	−۰/۲٤۵	−۰/٤۲	۰/۹۹	۱۱	−۰/۲٦۲	−۰/٤۷	۰/۹۷	۱٦/۹	−۰/۲٤۷	−۰/٤۷	۰/۹۷	۱۸/۱
0.1CMC	−۰/۲۳۸	−۰/۳٦	۰/۹۹	٦/۳	−۰/۲۵۲	−۰/٤	۰/۹۸	۱۰/۹	−۰/۲۷۷	−۰/٤٦	۰/۹۷	۱٤/۱
0.2CMC	−۰/۲۱۷	−۰/۲۹	۰/۹۹	٤/۲	−۰/۲۳۲	−۰/۳۲	۰/۹۸	۷/۱	−۰/۲٦۱	−۰/۳۸	۰/۹۸	۹/۲
U	−۰/۰۱	−۰/۱۵	۰/۹۹	۱/۹	−۰/۱٦۳	−۰/۲۳	۰/۹۹	۵/۷	−۰/۱۹۹	−۰/۳	۰/۹۸	۸/۲
U-0.1CMC	−۰/۱۵۱	−۰/۱۹	۰/۹۹	۰/۸	−۰/۲۱۵	−۰/۲۸	۰/۹۹	٤/۲	−۰/۲۱۵	−۰/۲۹	۰/۹۹	٤/۲
U-0.2CMC	−۰/۱۷۵	−۰/۲۱	۰/۹۹	۲/۵	−۰/۱۸۱	−۰/۲٤	۰/۹۹	۲/۷	−۰/۲۲۲	−۰/۳	۰/۹۹	۵/٤

مدل ۳	دما (°C)											
تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	R^2	RMSE ×10^{-3}
Control	−۰/۹۸	۰/۰۹۱	۰/۹٤	۲۳/٤	−۰/۹۷	۰/۰۹٦	۰/۹۰	۳۱/۹	−۰/۹۷	۰/۱۰۵	۰/۹۱	۳۳/۲
0.1CMC	−۰/۹۹	۰/۰۷۳	۰/۹٦	۱۳/۷	−۰/۹۸	۰/۰۷۹	۰/۹٤	۱۹	−۰/۹۸	۰/۰۸۲	۰/۹۰	۲۷/۱
0.2CMC	−۰/۱	۰/۰۵۱	۰/۹۹	۵/۲۲	−۰/۹۹	۰/۰٦	۰/۹۸	۸/۹	−۰/۹۹	۰/۰٦۸	۰/۹٤	۱۵/۷
U	−۱/۰۱	۰/۰۵٤	۰/۹۸	٦/٤٦	−۰/۱	۰/۰۵۹	۰/۹۹	۰/۸۵	−۰/۹۹	۰/۰۷۰۱	۰/۹۹	٦/٦۸
U-0.1CMC	−۱	۰/۰٤	۰/۹۹	۳/۵۳	−۰/۱	۰/۰٤۵	۰/۹۹	۳/٦	−۰/۹۹	۰/۰۵۵	۰/۹۹	۵/٤٦
U-0.2CMC	−۱	۰/۰۳٦	۰/۹۹	۱/۰۹	−۰/۱	۰/۰٤۸	۰/۹۹	۲/۵	−۰/۹۹	۰/۰۵۵	۰/۹۹	٦/۰٦

ادامه جدول ۵

مدل ۴	دما (°C)											
تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R^2	RMSE $\times10^{-3}$	a	b	R^2	RMSE $\times10^{-3}$	a	b	R^2	RMSE $\times10^{-3}$
Control	۲/۸۹	٤/۳۳	۰/۹۹	۰/۷۷	۱/۸۳	٤/۳۱	۰/۹۹	۲/٦	۱/۸٦	۳/۸٦	۰/۹۹	۳/۳٦
0.1CMC	٥/۲۳	٤/۹	۰/۹۹	۰/۸۱	٥/۰٦	۳/٤٥	۰/۹۹	۲/۱٤	٥/۱۱	۲/۱	۰/۹۹	۱/۷
0.2CMC	۷/۰۱	۱۰/۰۸	۰/۹۹	۲/۳	٦/۳۳	٦/۸	۰/۹۹	۳/۳٤	٦/۰۱	٤/۱	۰/۹۹	۱/۹
U	۳/۷۸	۲۰/۲۸	۰/۹۹	۱/٤	٥/۱٤	۱۱/۸	۰/۹۹	۳/٥٥	٥/۰۱	۷/۱۳	۰/۹۹	۳/۹
U-0.1CMC	٦/٦۹	۲۲/۰۸	۰/۹۹	۱/٤	۷/۹	۱۱/٦	۰/۹۹	۱/٥٦	٦/٤۸	۹/۲	۰/۹۹	۱/٤
U-0.2CMC	۸/٤	۲۰/٤٥	۰/۹۹	۱/۷۷	٦/٥٦	۱٤/۳	۰/۹۹	۱/٤	٦/٦۸	۸/٥۲	۰/۹۹	۱/۷۷

مدل ۵	دما (°C)											
تیمار	۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
	a	b	R^2	RMSE $\times10^{-3}$	a	b	R^2	RMSE $\times10^{-3}$	a	b	R^2	RMSE $\times10^{-3}$
Control	٦/۱۹	۱/۸٤	۰/۹۹	۱/۱	٥/۲	۱/۹۳	۰/۹۹	۳/٤۹	٤/۷۸	۱/۹۲	۰/۹۹	٤/۲
0.1CMC	۸/۹٦	۱/۷٥	۰/۹۹	۲/۳	۷/٤۷	۱/۸۲	۰/۹۹	۱/۳۸	٦/۲٥	۱/۹۲	۰/۹۹	۱/۹۹
0.2CMC	۱٥/٦۱	۱/٦۳	۰/۹۹	۲/٥	۱۱/۸۹	۱/۷	۰/۹۹	۲/٦۲	۹/۰۳٤	۱/۸۱	۰/۹۹	۱/۲
U	۲۲/۱۷	۱/۳۳	۰/۹۹	۱/۳٥	۱٥/۳۹	۱/٥۲	۰/۹۹	۱/٤۷	۱۰/۸۹	۱/٦٤	۰/۹۹	۲/۱
U-0.1CMC	۲٦/٦۹	۱/٤۲	۰/۹۹	۲/٥	۱۸	۱/٦۲	۱/۰۰	۰/۲۸	۱٤/۲۷	۱/٦۳	۰/۹۹	۱/۷۱
U-0.2CMC	۲٦/۷۷	۱/٤۹	۰/۹۹	۰/۹	۱۹/۱۷	۱/٥۲	۰/۹۹	۲/۱	۱۳/۸٥	۱/٦٦	۰/۹۹	۰/٥۸

مدل ۶	دما (°C)															
تیمار	۱۵۰					۱۷۰					۱۹۰					
	a	b	c	R^2	RMSE $\times10^{-3}$	a	b	c	R^2	RMSE $\times10^{-3}$	a	b	c	R^2	RMSE $\times10^{-3}$
Control	۰/۱۹	۳/۸٦	۹/٥۲	۰/۹۹	۸/۳۹	۰/۲۱	٤/۲–	۸/۹	۰/۹۹	۸/۳٦	۰/۲۳	٤/۰۲–	۷/٤	۰/۹۹	۹/٤٦
0.1CMC	۰/۱٥	۳/٥٥	۹/۷۹	۰/۹۹	۸/٦	۰/۱۷	۳/۷–	۸/۱	۰/۹۹	۸/۲۸	۰/۱۷	٤/۲۷–	۸/٦	۰/۹۹	٦/۲۲
0.2CMC	۰/۱	۲/۹٤	۸/۸٤	۰/۹۷	۹/٦۹	۰/۱۲	۳/٤–	٦/۹	۰/۹۹	۷/۸٥	۰/۱٤	۳/۷۱–	۷/٥	۰/۹۹	٦/٦٤
U	۰/۱۲	۲/٤٦	۳/۹٥	۰/۹۷	۱۱/٤	۰/۱۳	۲/٥–	٤/٤	۰/۹٥	۱٤/٦	۰/۱٤	۳/۱۷–	٥/۳	۰/۹۸	۱۰/۱
U-0.1CMC	۰/۰۸	۲/۳٥	۵/٥۲	۰/۹٦	۸/٥۹	۰/۰۹	۲/۸–	۷/۳	۰/۹٦	۹/۸۲	۰/۱۱	۳/۲۱–	٥/۹	۰/۹۹	٦/۲۲
U-0.2CMC	۰/۰۷	۲/۲٥	٦/۹٦	۰/۹٦	۹/٦۸	۰/۰۹	۲/٥–	٥/۷	۰/۹۷	۹/۸۲	۰/۱۱	۳/۲٤–	٦/۳	۰/۹۹	٦/۹٤

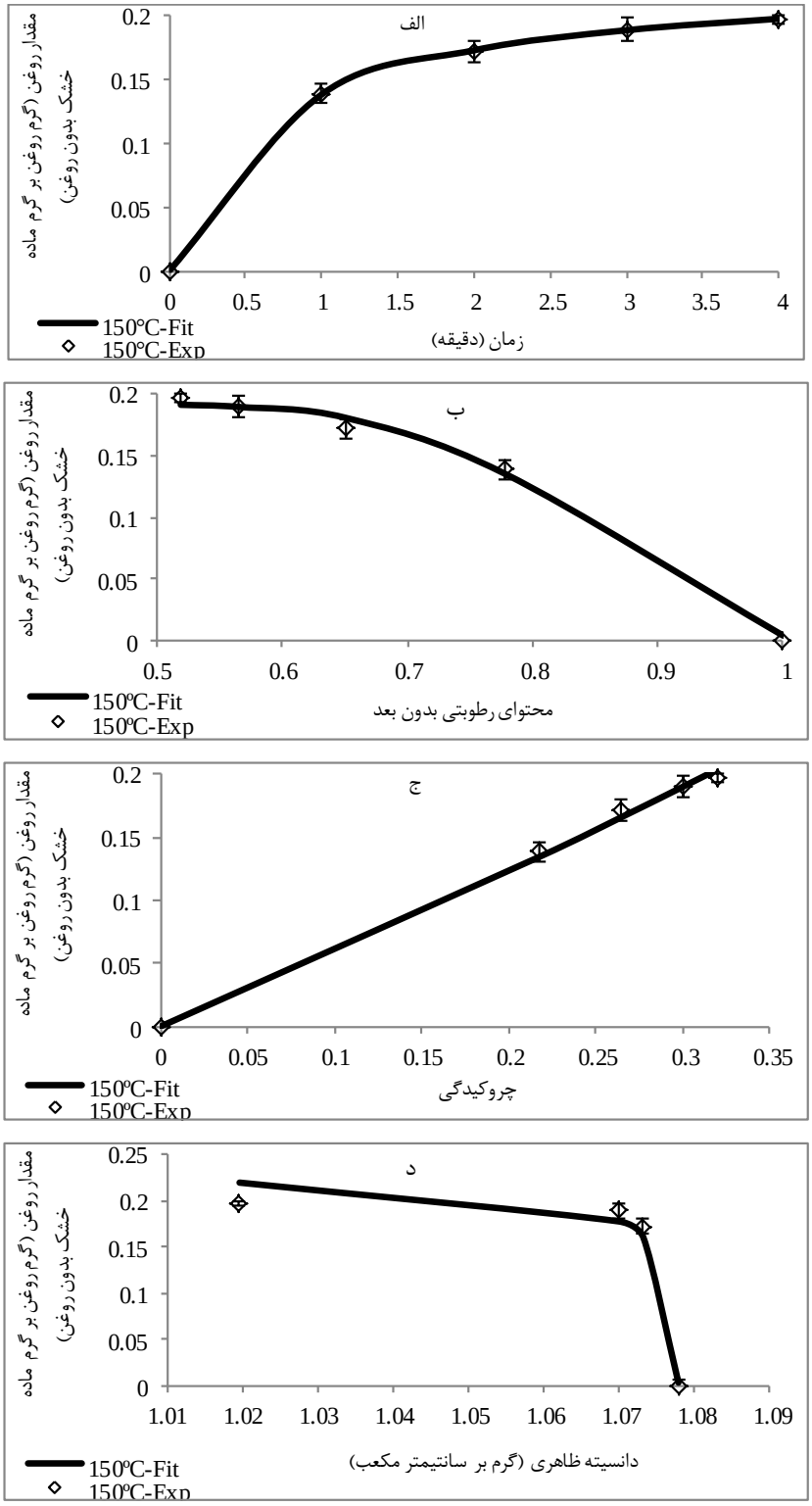
ادامه جدول ۵

مدل ۷	دما (°C)														
تیمار	۱۵۰					۱۷۰					۱۹۰				
	a	b	c	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	c	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	c	R^2	RMSE ×10^{-3}
Control	۰/۵۸	-	-	۰/۹۹	٤/۷	۰/۵٦	-	-	۰/۹٦	۱۷/۹	۰/۵۷	-	-	۰/۹۹	۳/٤٦
0.1CMC	۰/۵۲	–	–	۰/۹۹	٤/۵٤	۰/۵۱	-	-	۰/۹۹	٤/۱۵	۰/۵۳	-	-	۰/۹۹	٤/۸۱
0.2CMC	۰/۳۵	–	–	۰/۹۹	۳/۹۸	۰/۳۹	-	-	۰/۹۹	۵/۳۹	۰/٤٤	-	-	۰/۹۹	۳/۸۸
U	۰/۳٤	–	–	۰/۹٤	۱٦/۹	۰/۳٦	-	-	۰/۹۱	۱٤/۷	۰/٤٤	-	-	۰/۹٤	۱٤/۹
U-0.1CMC	۰/۲۸	–	–	۰/۹۱	۱۰	۰/۳۱	-	-	۰/۹۷	۵/۹۸	۰/۳۷	-	-	۰/۹٤	۱۰/۷
U-0.2CMC	۰/۲۷	–	–	۰/۹٦	۵/۹۸	۰/۳۰	–	–	۰/۹٦	۸/۱۲	۰/۳۵	–	–	۰/۹۷	۷/۳

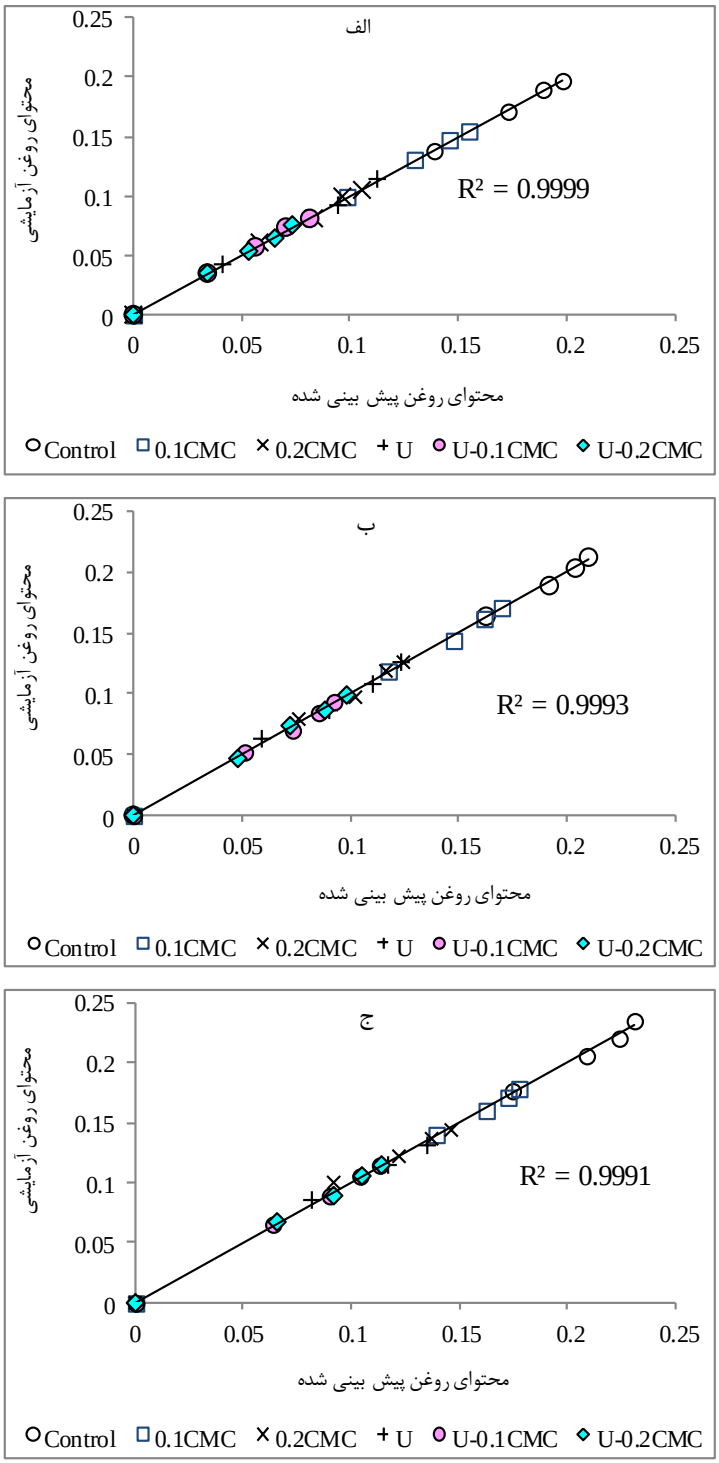
مدل ۸	دما (°C)														
تیمار	۱۵۰					۱۷۰					۱۹۰				
	a	b	c	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	c	R^2	RMSE ×10^{-3}	a	b	c	R^2	RMSE ×10^{-3}
Control	−٤۳۲	۹۰۳	−٤۷۱	۰/۹۳	٤٤/۱	−۲۱/۳	٤۳/۹	−۲۲	۰/۹۸	٤/۵٤	−۱۱/۷	۲۳/٦	−۱۲	۰/۹٦	۸/۷۹
0.1CMC	−۲۲۱	٤٦۱	−۲٤۰	۰/۹۳	۳۲/۸	−۳/۸	۷/۳۰	−۳/۳	۰/۹۲	۱۰/٦	−۳/۰۵	۵/۸۱	−۲/٦	۰/۹۷	٤/۸۳
0.2CMC	−٦۹/۲	۱٤۳	−۷٤	۰/۹۷	۱۵/۳	−۳/۵۱	٦/۷۰	−۳/۱	۰/۹٦	٦/۸	−۲/۰۵	۳/۸۰	−۱/٦	۰/۹۹	۲/۹۹
U	−۷/٤۱	۱٤/٦	−۷/۱	۰/۹۳	۱٤/٤	−۰/٦۹	۱/۰۲	−۰/۲	۰/۹۵	۱۰/۱	−۰/۷	۱/۱۰	−۰/۳	۰/۹۳	۱۲/۷
U-0.1CMC	−۵/٦٦	۱۱/۲	−۵/۵	۰/۹۹	۱/۲۵	−۱/۱۱	۱/۹۵	−۰/۸	۰/۹٦	۵/۸۳	−۲/۰۹	۳/۸۰	−۱/٦	۰/۹٤	۹/۱۲
U-0.2CMC	−۳/۱٦	٦/۱۳	−۲/۹	۰/۹۹	۲/۸۵	−۱/۵۳	۲/۷۰	−۱/۱	۰/۹۷	۷/۰۹	−۱/۵۵	۲۸/٦	−۱/۱	۰/۹۳	۹/۳۵

همان‌گونه که از این شکل و جدول ۵ مشخص است، مدل پیشنهادی ٤، به عنوان یکی از بهترین مدل‌های پیشنهادی به خوبی قادر به برازش داده‌های آزمایشی بود. شکل ۳- ب، ۳- ج و ۳- د، برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن نمونه شاهد سرخ‌شده در دمای ۱۵۰°C را به ترتیب به صورت توابعی از محتوای رطوبت بدون بعد، میزان چروکیدگی و چگالی ظاهری با توجه به مدل‌های پیشنهادی ٦، ۷ و ۸ نشان می‌دهد.

شکل ٤، مقادیر میانگین محتوای روغن آزمایشی در مقابل مقادیر همان پارامتر که از مدل پیشنهادی مویانو و پدرسچی (۲۰۰٦) به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. این مدل، همبستگی خوبی با نتایج آزمایشی داشت و با همه پیش-تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش هماهنگی خوبی نشان داد ($R^2_{average}$ =۰/۹۹۹).



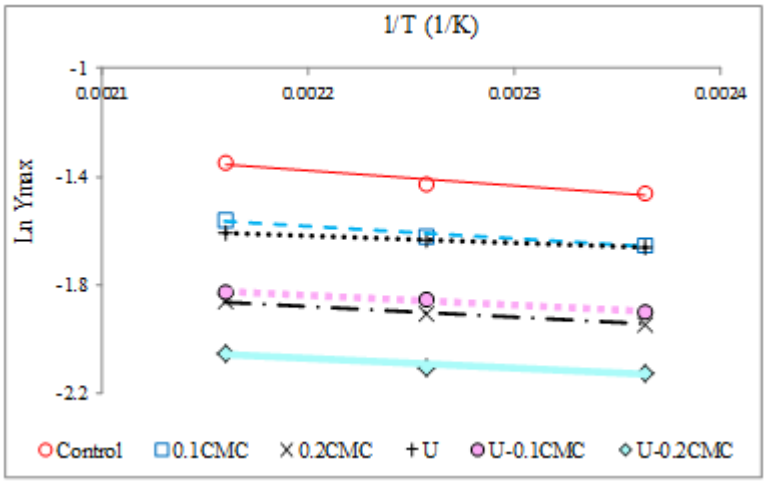
شکل ۳- برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن نمونه شاهد سرخ‌شده با مدل‌های ۴، ۶، ۷ و ۸ در دمای ۱۵۰°C به صورت تابعی از: الف) زمان، ب) محتوای رطوبت بدون بعد، ج) چروکیدگی و د) چگالی ظاهری



شکل ۴- مقادیر میانگین محتوای روغن آزمایشی در مقابل محتوای روغن به‌دست‌آمده از مدل تجربی مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶) حین سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان در دماهای ۱۵۰ (الف)، ۱۷۰ (ب) و ۱۹۰C° (ج) در پیش-تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

انرژی فعال‌سازی

شکل ۵، منحنی تغییرات LnY_{max} را به‌صورت تابعی از عکس دمای مطلق، بر طبق رابطه آرنیوس، برای تیمارهای مختلف مطابق جدول ۱ نشان می‌دهد. نمونه پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت، بیشترین مقادیر LnY_{max} در برابر 1/T را از خود نشان داد و نمونه پیش-تیمارشده با امواج فراصوت - کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۲٪، کمترین میزان این پارامتر را در شکل مذکور به خود اختصاص داد. انرژی فعال‌سازی به‌عنوان شاخصی برای تعیین میزان حساسیت نسبت به دما مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، بیشترین میزان انرژی فعال‌سازی نشانگر بیشترین تغییرات در میزان جذب روغن در اثر تغییر دما است. بنابراین، دلیل افزایش انرژی فعال‌سازی در یک نمونه این است که میزان جذب روغن آن نمونه در اثر تغییرات دمایی به مقدار بیشتری تغییر می‌کند (مویانو و پدرسچی ۲۰۰۶). جدول ٦، مقادیر Y_0، K_0 و انرژی فعال‌سازی را برای پارامترهای Y_{max} و K_y طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده مطابق جدول ۱ نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، نمونه شاهد، با دارا بودن ٤/٦٢٨ kJ/mol- بیشترین میزان انرژی فعال‌سازی را برای پارامتر Y_{max} به‌خود اختصاص داد و به‌همین دلیل، بیشترین تغییرات در میزان جذب روغن را در اثر تغییر دما نشان داد. بعد از آن، پیش‌تیمار پوشش خوراکی با غلظت ۰/۱ و ۰/۲٪، پیش‌تیمار امواج فراصوت - پوشش خوراکی ۰/۱و ۰/۲٪ و در نهایت امواج فراصوت با دارا بودن ٣/٨٤-، ٣/٥١٩-، ٣/١٦٦-، ٢/٩٥- و ٢/٠٨٦- به ترتیب بیشترین مقادیر انرژی فعال‌سازی را برای پارامتر مذکور داشتند. همچنین، بیشترین میزان انرژی فعال‌سازی برای پارامتر K_y متعلق به نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت (٥٤/١٦٢- کیلوژول بر مول) و کمترین میزان آن مربوط به نمونه پیش‌تیمارشده با کربوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۲٪ (١٥/٠٤٥- کیلوژول بر مول) بود. تأثیر پوشش خوراکی و امواج فراصوت روی انرژی فعال‌سازی، Y_{max} و K_y از لحاظ آماری نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار بود.



شکل ۵- منحنی تغییرات Ln Y_{max} در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C بر طبق معادله آرنیوس حین سرخ‌کردن طبق جدول ۱

جدول ۶- مقادیر پیش‌فاکتور نمایی و انرژی فعال‌سازی برای Y_{max} و K_y طی سرخ‌کردن مطابق جدول ۱

تیمار	Y_{max}			K_y		
	Y_o	E_a	R^2	K_o	E_a	R^2
Control	−۰/۱۵۵	−٤/٦٢٨[a]	۰/۹٥٤	۷/۳۲۱	−۲٤/۱٤٦[c]	۰/۹۲٥
0.1CMC	−۰/٥٦۷	−۳/۸٤۱[b]	۰/۹۷۳	۷/٥۰۰	−۲٦/۱٦٥[c]	۰/۹۹۹
0.2CMC	+۱/۰۱۷	−۳/٥۱۹[b]	۰/۹۸۸	۳/۹٤٦	−۱٥/۰٤٥[d]	۰/۹۱۰
U	−۰/۰٦۷	−۲/۰۸٦[d]	۰/۹۹۹	۱۳/۷۷٦	−٥٤/۱٦۲[a]	۰/۹۸۳
U-0.1CMC	+۰/۹۹۹	−۳/۱٦٦[c]	۰/۹۷۰	۸/۷۹۰	−۳٤/٦۸۰[b]	۰/۸۰٥
U-0.2CMC	−۱/۲۹۳	−۲/۹٤۹[c]	۰/۹٥۸	٥/۱٦۱	−۲۱/٤٥٥[cd]	۰/۸۷۸

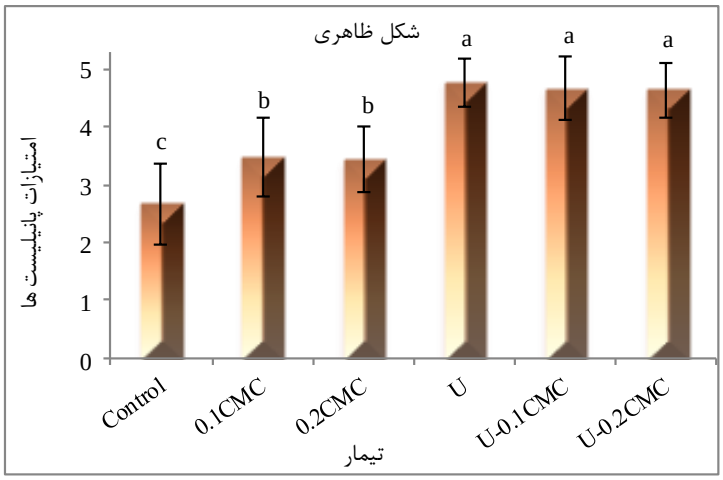
ارزیابی حسی

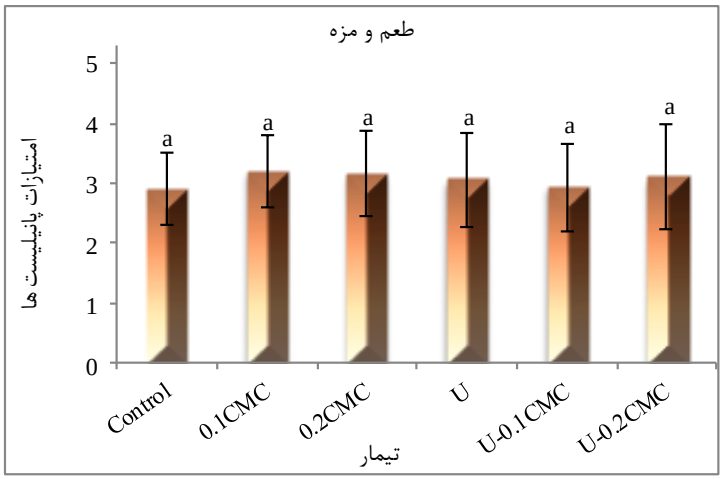
نتایج حاصل از ارزیابی حسی تیمارهای مختلف قطعات سیب‌زمینی مطابق جدول ۱ و سرخ‌شده به مدت ٤ دقیقه در دمای ۱۹۰C° در شکل ٦ آمده است. در ارتباط با شکل ظاهری، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت و پوشش خوراکی امتیاز بالاتری توسط ارزیاب‌ها کسب کردند و تأثیر این دو پیش‌تیمار از لحاظ آماری معنی‌دار بود. این امر به‌دلیل کاهش چروکیدگی در اثر استفاده از پیش‌تیمارها می‌باشد که باعث مقبولیت بیشتر محصول توسط مصرف‌کننده گردید (یدالهی‌نیا و جهانگیری ۲۰۰۹). پیش‌تیمارهای اعمالی تأثیر معنی‌داری روی طعم و مزه نداشتند. این نتیجه مشابه یافته گارسیا و همکاران (۲۰۰۲) بود.

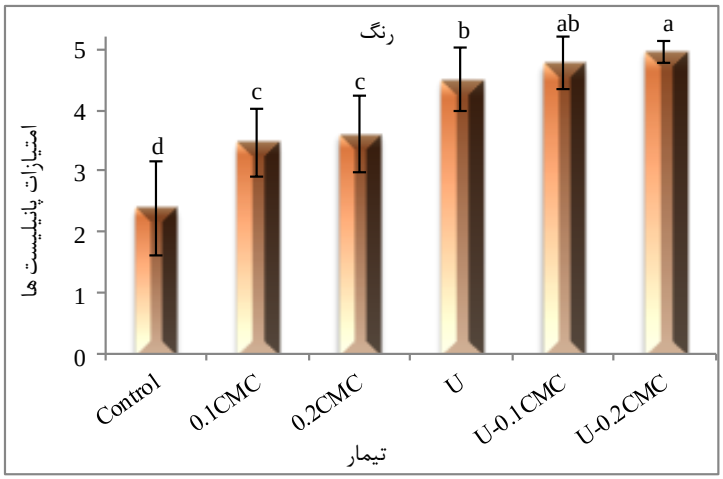
رنگ نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت - پوشش خوراکی ۰/۲٪ از لحاظ روشنایی بیشترین امتیاز را کسب کرد و تأثیر این دو پیش‌تیمار در دو حالت مجزا و تلفیقی روی نمونه‌ها معنی‌دار بود. در استفاده از پوشش خوراکی به عنوان پیش‌تیمار، کاهش رنگ در اثر استفاده از پوشش‌های خوراکی را می‌توان به دمای پایین‌تر نمونه‌های پوشش‌داده‌شده حین فرآیند سرخ‌کردن (کاهش انتقال حرارت در اثر لایه فیلم) در مقایسه با نمونه شاهد و در نتیجه، کاهش سرعت واکنش مایلارد که اصلی‌ترین عامل تشکیل رنگ در دماهای بالاست، نسبت داد (براوو و همکاران ۲۰۰۹؛ کیم و همکاران ۲۰۱۱). در ارزیابی حسی که توسط گارسیا و همکاران (۲۰۰۲) روی قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با متیل‌سلولز در فرآیند سرخ‌کردن انجام شد، نمونه‌های پیش‌تیمارشده از لحاظ رنگ امتیاز بیشتری نسبت به نمونه شاهد کسب کردند. از لحاظ بو نیز تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌ها مشاهده نگردید.

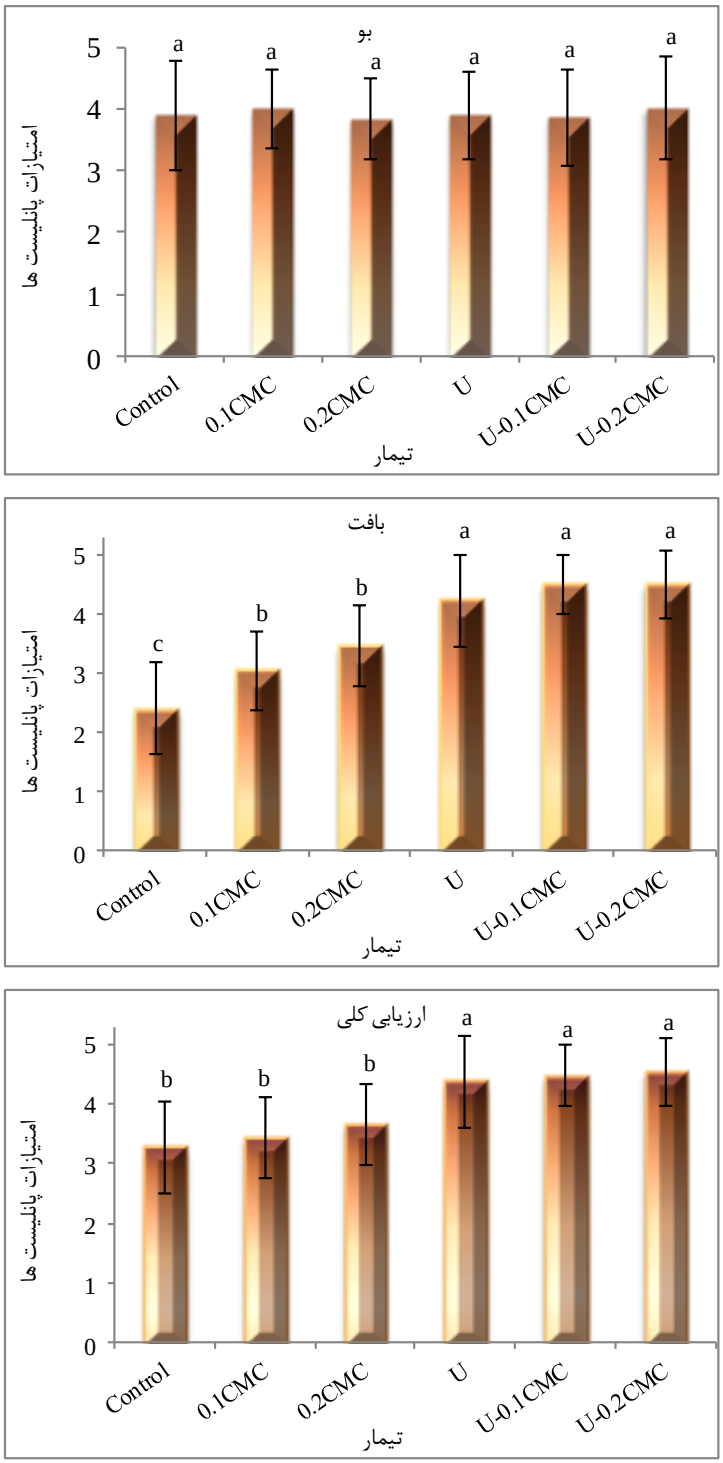
نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت - پوشش خوراکی، تردتر بوده و بالاترین امتیاز را از لحاظ بافت کسب کردند و تأثیر این دو پیش‌تیمار روی این ویژگی معنی‌دار بود. کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱) تردی محصول سرخ‌شده را به خاصیت الاستیکی ارتباط دادند. در استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار، افزایش تردی را می‌توان به خروج بیشتر رطوبت و در نتیجه کاهش ضریب الاستیسیته نسبت داد (تایوو و بیک ۲۰۰۷). همچنین، احتمالاً به‌دلیل چروکیدگی پایین و چگالی ظاهری کمتر، محصول تخلخل بیشتر داشته و تردتر خواهد بود.

در ارزیابی کلی، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت - پوشش خوراکی ۰/۲ و ۰/۱٪ بالاترین امتیاز را داشتند و بعد از آن نیز بیشترین امتیاز مربوط به پیش‌تیمار امواج فراصوت تنها بود؛ به‌دلیل این‌که این پیش‌تیمار باعث بهبود ظاهر، رنگ و بافت نمونه‌ها شد. قابل ذکر است که تأثیر پیش‌تیمار امواج فراصوت روی این فاکتور معنی‌دار بود. این نتیجه، مطابق نتایج به‌دست‌آمده توسط گارسیا و همکاران (۲۰۰۲) بود.


شکل ظاهری
امتیازات پانیلیست ها
0
1
2
3
4
5
c
b
b
a
a
a
Control
0.1CMC
0.2CMC
U
U-0.1CMC
U-0.2CMC
تیمار


طعم و مزه
امتیازات پانیلیست ها
0
1
2
3
4
5
a
a
a
a
a
a
Control
0.1CMC
0.2CMC
U
U-0.1CMC
U-0.2CMC
تیمار


رنگ
امتیازات پانیلیست ها
0
1
2
3
4
5
d
c
c
b
ab
a
Control
0.1CMC
0.2CMC
U
U-0.1CMC
U-0.2CMC
تیمار



شکل ۶- امتیازات ارزیاب‌ها به فاکتورهای مختلف مربوط به قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده (بر اساس جدول ۱) و سرخ‌شده در دمای ۱۹۰°C به مدت ۴ دقیقه.

حروف لاتین متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ٪۵ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دمای سرخ‌کردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰C°، میزان جذب روغن در تمامی نمونه‌ها در زمان‌های یکسان، افزایش یافت. پیش‌تیمار پوشش خوراکی در هر دو غلظت ۰/۱و ۰/۲٪ میزان جذب روغن را نسبت به نمونه شاهد کاهش داد و این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار بود. پیش‌تیمار امواج فراصوت نیز میزان جذب روغن را کاهش داد و این کاهش از لحاظ آماری نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار بود. علاوه بر این، تلفیق دو پیش‌تیمار مذکور تأثیر بیشتری در کاهش جذب روغن در مقایسه با هرکدام از پیش‌تیمارها به تنهایی داشت. مدل مویانو و پدرسچی و تمامی مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش، داده‌های حاصل از آزمایش را برای همه پیش‌تیمارهای مورد آزمون با ضریب همبستگی بالا برازش کردند. همچنین، پیش‌تیمار پوشش خوراکی و تلفیق آن با پیش‌تیمار امواج فراصوت باعث بهبود ویژگی‌های حسی نمونه‌های سرخ‌شده در مقایسه با نمونه شاهد گردید.

منابع مورد استفاده

Aguilera JM and Gloria-Hernandez H, 2000. Oil absorption during frying of frozen par-fried potatoes. Journal of Food Science 65: 476-479.

Albert S, and Mittal GS, 2002. Comparative evaluation of edible coatings to reduce fat uptake in a deep-fried cereal product. Food Research International 35(5): 445-458.

Alvarez MD, Morillo MJ and Canet W, 2000. Characterization of the frying process of fresh and blanched potato strips using response surface methodology. European Food Research and Technology 211: 326-335.

Annapure US, Singhal RS and Kulkarni PR, 1999. Screening of hydrocolloids for reduction in oil uptake of a model deep fat fried product. Fett/Lipid 101(6): 217-221.

AOAC. 1995. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.

Bajaj I and Singhal R, 2007. Gellan gum for reducing oil uptake in sev, a legume based product during deep-fat frying. Food Chemistry 104(4): 1472-1477.

Blumenthal MM, 1991. A new look at the chemistry and physics of deep fat frying. Food Technology 45(2): 68-71, 94.

Blumenthal MM and Stier RF, 1991. Optimization of deep-fat-frying operations. Trends in Food Science and Technology 2: 144-148.

Bouchon P, Aguilera JM and Pyle DL, 2003. Structure oil-absorption relationships during deep-fat frying. Journal of Food Science 68(9): 2711-2716.

Bourtoom T, 2008. Edible films and coatings: characteristics and properties. International Food Research Journal 15(3): 1-12.

Bravo J, Ruales NSJ and Mulet A, 2009. Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. Drying Technology 27: 782-786.

Bunger A, Moyano P, and Rioseco V, 2003. NaCl soaking treatment for improving the quality of french-fried potatoes. Food Research International 36: 161-166.

Dana D and Saguy IS, 2006. Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. Advances in Colloid and Interface Science 128: 267-272.

Datta AK, 2007. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. Journal of Food Engineering 80: 80-95.

Duran M, Pedreschi F, Moyano P and Troncoso E, 2007. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. Journal of Food Engineering 81(1): 257-265.

FAOSTAT. 2011. Potato production database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available from: <www.fao.org>.

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: 217-223.

Fernandes FAN and Rodrigues S, 2007. Use of ultrasound as pretreatment for drying of fruits: dehydration of banana. Journal of Food Engineering 82: 261-267.

Fernandes FAN, Gallão MI and Rodrigues S, 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. Journal of Food Engineering 90(2): 186-190.

Gamble MH, Rice P and Selman JD, 1987. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from C.V. record U.K. tubers. International Journal of Food Science and Technology 22: 233-241.

Garayo J and Moreira R, 2002. Vacuum frying of potato chips. Journal of Food Engineering 55: 181-191.

Garcia MA, Ferrero C, Bértola N, Martino M and Zaritzky N, 2002. Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. Innovative Food Science and Emerging Technologies 3(4): 391-397.

Garcia-Noguera J, Oliveiray FIP, Gallao MI, Weller CL, Rodrigues S and Fernandes FAN, 2010. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. Drying Technology 28: 294-303.

Ghanbarzadeh B, Almasi H and Entezami AA, 2010. Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films. Innovative Food Science & Emerging Technologies 11: 697-702.

Gupta P, Shivhare US and Bawa AS, 2000. Studies on frying kinetics and quality of French fries. Drying Technology 18(1-2): 311-321.

Howarth N, Huang T, Roberts S and McCrory M, 2005. Dietary fiber and fat are associated with excess weight in young and middle-aged US adults. Journal of the American Dietetic Association 105(9): 1365-1372.

Kim DN, Lim J, Bae IY, Lee HG and Lee S, 2011. Effect of hydrocolloid coatings on the heat transfer and oil uptake during frying of potato strips. Journal of Food Engineering 102: 317-320.

Kock SD, Minnar A, Berry D and Taylor JRN, 1995. The effect of freezing rate on the quality of cellular and non-cellular par-cooked starchy convenience foods. LWT - Food Science and Technology 28: 87-95.

Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB and Marinos-Kouris D, 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. Journal of Food Engineering 44: 39-46.

Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB and Marinos-Kouris D, 2001. Effect of pre-treatment on viscoelastic behaviour of potato strips. Journal of Food Engineering 50: 11-17.

Lamberg I, Hallstorm B and Olsson H, 1990. Fat uptake in a potato drying/frying process. LWT - Food Science and Technology 23(4): 295-300.

Math RG, Velu V, Nagender A and Rao DG, 2004. Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. Journal of Food Engineering 64: 429-434.

Matz SA, 1993. Snack food technology. Van Nostrand Reinhold/AVI, New York.

Mellema M, 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. Trends in Food Science and Technology 14(9): 364-373.

Mir-Bel J, Oria R and Salvador ML, 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. Journal of Food Engineering 95(3): 416-422.

Moreira RG and Chen Y, 1997. Modelling of batch deep fat frying process for tortilla chips. Transactions of IChemE. 75C: 181–190.

Moreira RG, Sun X and Chen Y, 1997. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep fat frying. Journal of Food Engineering 31: 485-498.

Moreira R and Barrufet M, 1998. A new approach to describe oil absorption in fried foods: A simulation study. Journal of Food Engineering 35: 1-22.

Moreira RG, Castell-Perez ME and Barrufet MA, 1999. Deep-fat frying: Fundamentals and applications. Aspen Publishers, Gaithensburg.

Moyano PC, Ríoseco VK and Gonzaléz PA, 2002. Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated French fries. Journal of Food Engineering 54: 249-255.

Moyano PC and Pedreschi F, 2006. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: effect of pre-treatments. LWT - Food Science and Technology 39: 285-291.

Pinthus EJ, Weinberg P and Saguy IS, 1995. Oil uptake in deep fat frying as affected by porosity. Journal of Food Science 60: 767-769.

Saguy IS, Gremaud E, Gloria H and Turesky RJ, 1997. Distribution and quantification of oil uptake in French fries utilizing a radiolabeled 14c palmitic acid. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45: 4286-4289.

Singh RP, 1995. Heat and mass transfer in food during deep-fat frying. Food Technology 49 (4): 134-137.

Steel RGD, Torrie JH and Dickey DA, 1997. Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. McGraw-Hill, New York.

Suárez RB, Campañone LA, García, MA and Zaritzky NE, 2008. Comparison of the deep frying process in coated and uncoated dough systems. Journal of Food Engineering 84(3): 383-393.

Taiwo KA and Baik OD, 2007. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. LWT - Food Science and Technology 40: 661-668.

Thanopoulou AC, Karamanos BG, Angelico FV, Assaad-Khalil SH, Barbato AF and Del-Ben MP, 2003. Dietary fat intake as risk factor for the development of diabetes: Multinational, multicenter study of the mediterranean group for the study of diabetes (MGSD). Diabetes Care 26(2): 302-307.

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.

Ufheil G and Escher F, 1996. Dynamics of oil uptake during deep-fat frying of potato slices. LWT - Food Science and Technology 29: 640-644.

Velasco J, Marmesat S and Dobarganes C, 2008. Chemistry of frying. In: Sahin S, Sumnu SG, (Eds). Advances in deep-fat frying of foods. CRC Press, Boca Raton.

Vitrac O, Dufour D, Trystram G and Raoult-Wack AL, 2002. Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. Journal of Food Engineering 53(2): 161-176.

Williams R and Mittal GS, 1999. Water and fat transfer properties of polysaccharide films on fried pastry mix. LWT - Food Science and Technology 32: 440-445.

Yadollahinia A and Jahangiri M, 2009. Shrinkage of potato slices during drying. Journal of Food Engineering 94: 52-58.

Ziaiifar AM, Achir N, Courtois F, Trezzani I and Trystram G, 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. International Journal of Food Science and Technology 43(8): 1410-1423.

Ziaiifar AM, Courtois F and Trystram G, 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. Journal of Food Process Engineering 33(2): 191-212.

Empirical modeling of oil uptake and investigating the influence of ultrasound and edible coating during frying of potato strips

T Ronaghi[1], J Dehghannya[2*] and B Ghanbarzadeh[2]

Received: November 04, 2015 Accepted: February 08, 2016

[1]MSc Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]Associate 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 oil uptake during deep-fat frying of potato slices pretreated with 0.1 and 0.2% carboxymethyl cellulose concentration and 40 kHz ultrasound frequency for 15 minutes. Potato slices were cut into 1.2×1.2×4 cm^3 rectangular pieces and after performing the pretreatments, frying process was done at three different temperatures of 150, 170 and 190ºC for 1, 2, 3 and 4 minutes. Oil uptake in the fried potato pieces was decreased using ultrasound and edible coating pretreatments in both concentrations of carboxymethyl cellulose and this reduction was statistically significant compared to control samples. The use of ultrasound together with carboxymethyl cellulose led to further reduction in oil uptake compared to the other samples. A number of empirical proposed models with two models in the literature were used for modeling oil uptake. Average correlation coefficient between experimental and models data was high. The influence of temperature on maximum oil content and specific rate of oil uptake was investigated using the Arrhenius equation. In addition, sensorial analysis showed that ultrasound and its combination with edible coating pretreatment improves sensory characteristics of fried potato slices.

Keywords: Deep-fat frying, Modeling, Ultrasound, Edible coating, Oil uptake