

تأثیر افزودن بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم به روغن، روی سینتیک چروکیدگی، طی سرخ کردن قطعات سیب زمینی

جلال دهقان نیا^{۱*}، ژیلا رنجزاد^۲ و بابک قنبرزاده^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۴/۴)

چکیده

هدف این تحقیق، بررسی تأثیر شرایط فرآیند و افزودن بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم به روغن روی سینتیک چروکیدگی طی سرخ کردن قطعات سیب زمینی بود. بتاسیکلودکسترین در غلظت‌های ۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر و کلرید سدیم با غلظت‌های ۱ و ۳ درصد به روغن سرخ کردنی افزوده شد. سپس قطعات سیب زمینی با ابعاد ۱/۲×۱/۲×۴ سانتی‌متر مکعب در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای فرآیند از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس، میزان چروکیدگی قطعات سیب زمینی افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، افزایش زمان سرخ کردن نیز منجر به افزایش میزان این پارامتر گردید. تیمارهای کلرید سدیم و بتاسیکلودکسترین در هر دو غلظت، به صورت مجزا و تلفیقی، میزان چروکیدگی را نسبت به نمونه شاهد به‌طور میانگین از ۰/۳۱۴ تا ۰/۲۷۸ (۱۱/۴۶٪) کاهش دادند. به دلیل فقدان مدل‌های تجربی مناسب در منابع جهت مدل‌سازی چروکیدگی طی فرآیند سرخ کردن عمیق، تعدادی مدل تجربی برای مدل‌سازی این پارامتر پیشنهاد گردید. میانگین ضریب همبستگی بین نتایج آزمایش با یافته‌های حاصل از این مدل‌ها بالا بود. استفاده از ترکیبات مؤثر بر کشش سطحی هم‌چون بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم، به‌عنوان یک راه‌کار امیدبخش در بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی محصولات سرخ‌شده از جمله کاهش میزان چروکیدگی نمونه‌ها، می‌تواند در تحقیقات مختلف مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، پارامترهای فرآیند، جذب روغن، چروکیدگی

۱ و ۳. به‌ترتیب دانشیار و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، پردیس بین‌المللی ارس

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

مقدمه

در میوه‌ها و سبزی‌هایی مانند سیب‌زمینی که محتوای رطوبت اولیه بالایی دارند، خروج آب حین حرارت دیدن، باعث کاهش فشار وارده از مایع داخل سلولی بر دیواره سلولی شده و این عدم تعادل فشار بین داخل و خارج ماده غذایی، انقباضاتی ایجاد می‌کند که در نهایت منجر به فروپاشی و تغییر در شکل و یا چروکیدگی ماده غذایی می‌شود که این تغییرات به‌همراه تغییرات ایجاد شده در رنگ، خصوصیات انتقالی و کیفیت محصول نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۳، ۸، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۴، ۲۵ و ۲۶).

چروکیدگی به‌صورت کاهش در ابعاد و اندازه ماده غذایی تعریف می‌شود (۱۲) ابتدا در قسمت سطحی اتفاق افتاده و سپس به نواحی درونی پیش‌روی می‌کند. این پدیده سطحی در فرآیند سرخ‌کردن، در مراحل اولیه رابطه مستقیمی با مقدار رطوبت خارج شده از محصول دارد؛ یعنی هر چقدر رطوبت خارج شده از محصول بیشتر باشد به‌همان اندازه تغییرات حجمی نیز افزایش یافته و به میزان چروکیدگی نیز اضافه می‌گردد و تقریباً معادل مقدار رطوبت خارج شده می‌باشد و در مراحل نهایی به‌دلیل کاهش محتوای رطوبت از مقدار آن کاسته می‌شود. از طرف دیگر، تشکیل پوسته سخت در ماده غذایی در مراحل پایانی فرآیند سرخ‌کردن، مانعی در برابر خروج رطوبت بوده و این پدیده منجر به کاهش چروکیدگی در زمان‌های نهایی سرخ‌کردن می‌گردد (۹ و ۲۲). بنابراین، میزان خروج آب از ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، رابطه بسیار نزدیکی با بروز پدیده چروکیدگی دارد. هرناندز و همکاران در سال ۲۰۰۰ (۱۱) و ال‌محتسب و همکاران در سال ۲۰۰۴ (۱) در تحقیق‌های خود به این نتیجه رسیده‌اند که بین میزان چروکیدگی حجمی و محتوای رطوبت ارتباط تنگاتنگی وجود دارد.

با گذشت زمان در طول فرآیند سرخ‌کردن، به‌دلیل خروج رطوبت از داخل ماده غذایی به‌صورت انتشار، فشار بخار در داخل فضاهای خالی افزایش و حجم این فضاها گسترش می‌یابد؛ با افزایش حجم فضاهای خالی، با توجه به رابطه

شماره (۱)، از میزان دانسیته ظاهری نیز کاسته می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که در نتیجه خروج رطوبت به‌صورت بخار، کاهش دانسیته ظاهری منجر به افزایش میزان چروکیدگی محصول می‌گردد (۱۲).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

در رابطه ۱، ρ دانسیته ظاهری محصول (g/cm^3)، M جرم محصول (g) و V حجم ظاهری محصول (cm^3) می‌باشد.

از طرف دیگر، به‌دلیل ارتباط بین حجم ماده غذایی با ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختاری آن، یکی از خصوصیات فیزیکی مهم در ماده غذایی خام یا سرخ‌شده، حجم نمونه غذایی می‌باشد. به‌طوری‌که شرایط فرآیند از جمله دما و زمان فرآیند سرخ‌کردن، میزان از دست دادن رطوبت، ضخامت اولیه ماده غذایی و میزان جذب روغن، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان چروکیدگی محصول دارد (۵، ۷، ۱۰، ۱۹ و ۲۹). در این راستا، بایک و میتال (۴) بیان کرده‌اند که افزایش دمای سرخ‌کردن منجر به افزایش میزان چروکیدگی در زمان‌های مشابه سرخ‌کردن شده و حدود ۵۰ درصد میزان چروکیدگی در یک سوم اولیه از کل زمان فرآیند سرخ‌کردن رخ می‌دهد. ضیائی‌فر و همکاران (۲۸) نیز، اثر دما و زمان سرخ‌کردن بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش دمای سرخ‌کردن در زمان‌های یکسان فرآیند، چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین تقریباً نصف میزان چروکیدگی در مراحل اولیه سرخ‌کردن رخ می‌دهد و در نهایت، به‌علت تشکیل یک پوسته سخت و محکم، چروکیدگی متوقف می‌گردد. بنابراین، می‌توان با اتخاذ دمای مناسب و راه‌کارهایی برای کاهش از دست دادن آب در طی فرآیند، میزان چروکیدگی را به حداقل مقدار ممکن کاهش داد.

یکی از راه‌کارهای پیشنهادی، استفاده از ترکیباتی است که کشتش سطحی بین ماده غذایی و روغن را تحت تأثیر قرار دهند که از آن جمله می‌توان به سیکلودکسترین‌ها و الکترولیت‌های قوی اشاره نمود. سیکلودکسترین‌ها از دسته مولکول‌های

روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی بهار (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه تهیه شده در شرکت صنعتی بهشهر) بود. از بتاسیکلودکستین با درجه خلوص $\geq 97\%$ (Cyclomaltoheptaose ساخت شرکت Sigma امریکا) و کلرید سدیم با درجه خلوص $\geq 99\%$ (Sodium chloride ساخت شرکت Merck آلمان) نیز به‌عنوان افزودنی به روغن سرخ‌کردنی استفاده گردید.

تجهیزات

سرخ‌کن مورد استفاده در این تحقیق، سرخ‌کن Moulinex (مدل F430.R، با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس، دارای محافظه ضد زنگ و سبک جدا شونده) بود. آن کنوکسیون (مدل BMI20، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن‌آزمای گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) نیز جهت اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌ها استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از شستشو و پوست‌گیری سیب‌زمینی‌ها، برای تهیه نمونه‌ها به شکل قطعات مکعب مستطیل با ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2$ سانتی‌متر (طول \times عرض \times ارتفاع)، از یک کاتر دستی طراحی شده با همین ابعاد استفاده شد. نمونه‌های برش داده شده جهت جلوگیری از اتلاف رطوبت در درون یک پلیت قرار گرفته و قبل از سرخ‌کردن، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند. آب اضافی با کاغذ جاذب رطوبت گرفته شده و قطعات سیب‌زمینی تا زمان سرخ‌کردن در پلیت‌های در بسته جهت جلوگیری از افت رطوبت نگهداری شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها برحسب نوع و میزان مواد افزودنی مورد استفاده (بتاسیکلودکستین و کلرید سدیم) به روغن سرخ‌کردنی، به چند دسته تقسیم شدند (جدول ۱).
۱: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

سیکلواولیگوساکارید می‌باشند که از تجزیه نشاسته به‌دست می‌آیند. ساختار خاص سیکلودکستین‌ها شامل یک بخش داخلی آب‌گریز و بخش بیرونی آب‌دوست است که آنها را قادر می‌سازد تا عوامل فعال سطحی را در داخل حفره‌های خود به شکل کمپلکس‌های میزبان - مهمان (Host-guest inclusion) به دام انداخته (۱۶) و از طرف دیگر به دلیل ساختار آب‌دوستی بخش خارجی و جذب در سطح ماده غذایی، موجب افزایش کشش سطحی و در نتیجه کاهش میزان انتقال جرم (از دست دادن رطوبت و جذب روغن) می‌گردد. الکترولیت‌های قوی از جمله کلرید سدیم نیز، به دلیل ماهیت یونی خود، با جذب در لایه سطحی و به دلیل افزایش کشش سطحی بین ماده غذایی و روغن، از دست دادن آب و جذب روغن در ماده غذایی را کاهش می‌دهند (۱۵).

از آنجایی‌که، یکی از اهداف اصلی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، کاهش محتوای رطوبت ماده غذایی تا یک حد معین می‌باشد و از طرف دیگر، خروج رطوبت (به‌جز برای محتوای رطوبت بسیار پایین) از ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، از عوامل اصلی در بروز پدیده کاهش حجم و در نتیجه، چروکیدگی در محصول نهایی سرخ‌شده می‌باشد، بنابراین، مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات حجمی یا ابعادی ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، حائز اهمیت می‌باشد (۶ و ۲۳). بنابراین، هدف این مطالعه، بررسی تأثیر افزودن بتاسیکلودکستین و کلرید سدیم به روغن روی میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق و مدل‌سازی چروکیدگی در طول این فرآیند بود.

مواد و روش‌ها

مواد

سیب‌زمینی (رقم آگریا محصول بومی استان آذربایجان شرقی با درصد رطوبت اولیه $82/84\%$) و روغن مایع به‌عنوان مواد خام مورد استفاده قرار گرفتند. سیب‌زمینی از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایشات در سردخانه بالای صفر نگهداری شد. روغن مورد استفاده در این مطالعه،

سرخ شده توسط پیکنومتر شیشه‌ای پُر شده با حلال تولوئن (تکنیک جابه‌جائی حلال) مطابق رابطه ۲ اندازه‌گیری شد (۲۸):

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho} \quad (1)$$

در رابطه ۲، V : حجم ظاهری اولیه یا سرخ شده (cm^3)، M : جرم نمونه (g)، M_1 : جرم پیکنومتر خالی و حلال (g)، M_2 : جرم پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (g) و p : دانسیته تولوئن (g/cm^3) می‌باشد. سپس، از نسبت اختلاف حجم نمونه خام و نمونه سرخ شده به حجم نمونه خام، میزان چروکیدگی به صورت عدد بدون بعد محاسبه شد (۲۲ و ۲۸).

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

در رابطه ۳، $S_{(t)}$: میزان چروکیدگی (عدد بدون بعد)، V_0 : حجم ظاهری نمونه خام (cm^3) و V_t : حجم ظاهری نمونه پس از سرخ شدن در زمان t (cm^3) می‌باشد.

اندازه‌گیری دانسیته ظاهری

بعد از اندازه‌گیری حجم ظاهری نمونه سرخ شده توسط پیکنومتر پُر شده از حلال تولوئن، از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ شده، مقادیر دانسیته ظاهری به صورت گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد (۲۸).

اندازه‌گیری محتوای روغن

سنجش میزان روغن نمونه‌های سرخ شده به وسیله استخراج روغن نمونه‌ها در دستگاه سوکسله با حلال پترولیوم اتر صورت گرفت (۲) و در نهایت بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

مدل‌سازی ریاضی چروکیدگی

در این تحقیق، مدل‌سازی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق به صورت تابعی از زمان، از دست دادن آب، جذب روغن و دانسیته ظاهری با استفاده از مدل‌های پیشنهادی صورت گرفت. ارزیابی مدل‌ها و تعیین بهترین مدل

۲ و ۳: نمونه‌هایی که در روغن حاوی بتاسیکلودکسترین به میزان ۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که در روغن حاوی کلرید سدیم به میزان ۱ و ۳ درصد (وزنی - حجمی) در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه‌هایی که با افزودن تلفیقی از بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم در مقادیر مورد نظر به روغن سرخ‌کردنی، سرخ شدند.

شرایط سرخ کردن

در هر آزمایش پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (براساس جدول ۱)، جهت سرخ کردن آنها، ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شد و بعد از افزودن ترکیبات، تنظیم دما و زمان سرخ کردن مورد نظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به طوری که پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای مورد نظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به میزان ۱۲۰ - ۱۰۰ گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند. سپس، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ شدن نمونه‌ها در مدت زمان مورد نظر، آنها را از سرخ‌کن بیرون آورده و بر روی کاغذ جاذب قرار داده شد تا روغن اضافی آنها گرفته شود و بلافاصله آنالیزهای مربوطه بر روی آنها انجام گرفت.

آزمایش‌ها

اندازه‌گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها، از طریق خشک کردن آنها در آون کنوکسیون در دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد (۲) و نتایج بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید.

اندازه‌گیری میزان چروکیدگی

برای محاسبه چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌های خام و

جدول ۱. علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

| علامت اختصاری | تیمار | ردیف |
|---------------|--|------|
| Control | شاهد | ۱ |
| B0.3 | روغن حاوی ۰/۳ گرم در لیتر بتاسیکلودکستین | ۲ |
| B0.6 | روغن حاوی ۰/۶ گرم در لیتر بتاسیکلودکستین | ۳ |
| NC1 | روغن حاوی ۱٪ (وزنی - حجمی) کلرید سدیم | ۴ |
| NC3 | روغن حاوی ۳٪ (وزنی - حجمی) کلرید سدیم | ۵ |
| NC1-B0.3 | روغن حاوی ۱٪ (وزنی - حجمی) کلرید سدیم و ۰/۳ گرم در لیتر بتاسیکلودکستین | ۶ |
| NC1-B0.6 | روغن حاوی ۱٪ (وزنی - حجمی) کلرید سدیم و ۰/۶ گرم در لیتر بتاسیکلودکستین | ۷ |
| NC3-B0.3 | روغن حاوی ۳٪ (وزنی - حجمی) کلرید سدیم و ۰/۳ گرم در لیتر بتاسیکلودکستین | ۸ |
| NC3-B0.6 | روغن حاوی ۳٪ (وزنی - حجمی) کلرید سدیم و ۰/۶ گرم در لیتر بتاسیکلودکستین | ۹ |

بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. هم‌چنین، برای انجام مقایسه میانگین از آزمون بونفرونی (۲۱) در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) استفاده شد.

نتایج و بحث

تأثیر شرایط فرآیند سرخ کردن بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده

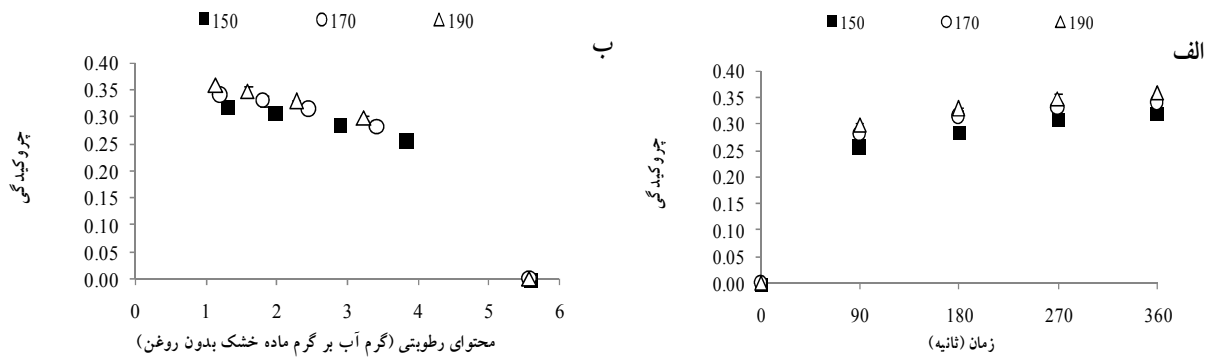
با پیشرفت زمان سرخ کردن، در تمامی دماها، میزان چروکیدگی نمونه‌ها افزایش یافت (شکل ۱-الف). در لحظات اولیه فرآیند، به دلیل بالا بودن میزان انتقال جرم، پدیده چروکیدگی با سرعت بالایی رخ داده و رفتار نمایی از خود نشان داد. با گذشت زمان سرخ کردن و رسیدن به لحظات پایانی، به دلیل کاهش محتوای رطوبت ماده غذایی از یک طرف و تشکیل پوسته سفت از طرف دیگر، خروج رطوبت از ماده غذایی با سرعت کمتری اتفاق افتاده و در نتیجه، آهنگ وقوع چروکیدگی کاهش یافته و به یک میزان تعادلی رسید. این یافته، با نتایج حاصل از مطالعات تایو و بایک مطابقت دارد (۲۲). کاواس و موریرا (۲۰۰۱) نیز در تحقیقی بر روی چیپس ذرت تورتیلا به این نتیجه رسیدند که چروکیدگی در طول سرخ کردن ارتباط تنگاتنگی با میزان تغییرات انتقال جرم دارد (۱۴).

در بررسی اثر دما بر میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد،

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. پارامترهای مدل‌های به کار رفته، از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با آنها، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست آمدند. هم‌چنین، به منظور یافتن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط (غلظت بتاسیکلودکستین، غلظت کلرید سدیم و دمای فرآیند سرخ کردن) تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره در نرم‌افزار Microsoft Excel 2007 انجام و معیار انتخاب بهترین رابطه، ضریب همبستگی (R^2) در نظر گرفته شد.

آنالیز آماری

در این مطالعه، ۹ تیمار نشان داده شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C و چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار ($2 \times 4 \times 3 \times 9 = 216$) سرخ شدند و تأثیر افزودن هر کدام از ترکیبات (کلرید سدیم و بتاسیکلودکستین) به روغن روی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی بررسی گردید. برای مشاهده اثر متقابل فاکتورها (بتاسیکلودکستین در ۲ سطح غلظت ۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر و کلرید سدیم در ۲ سطح غلظت ۱ و ۳ درصد)، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح



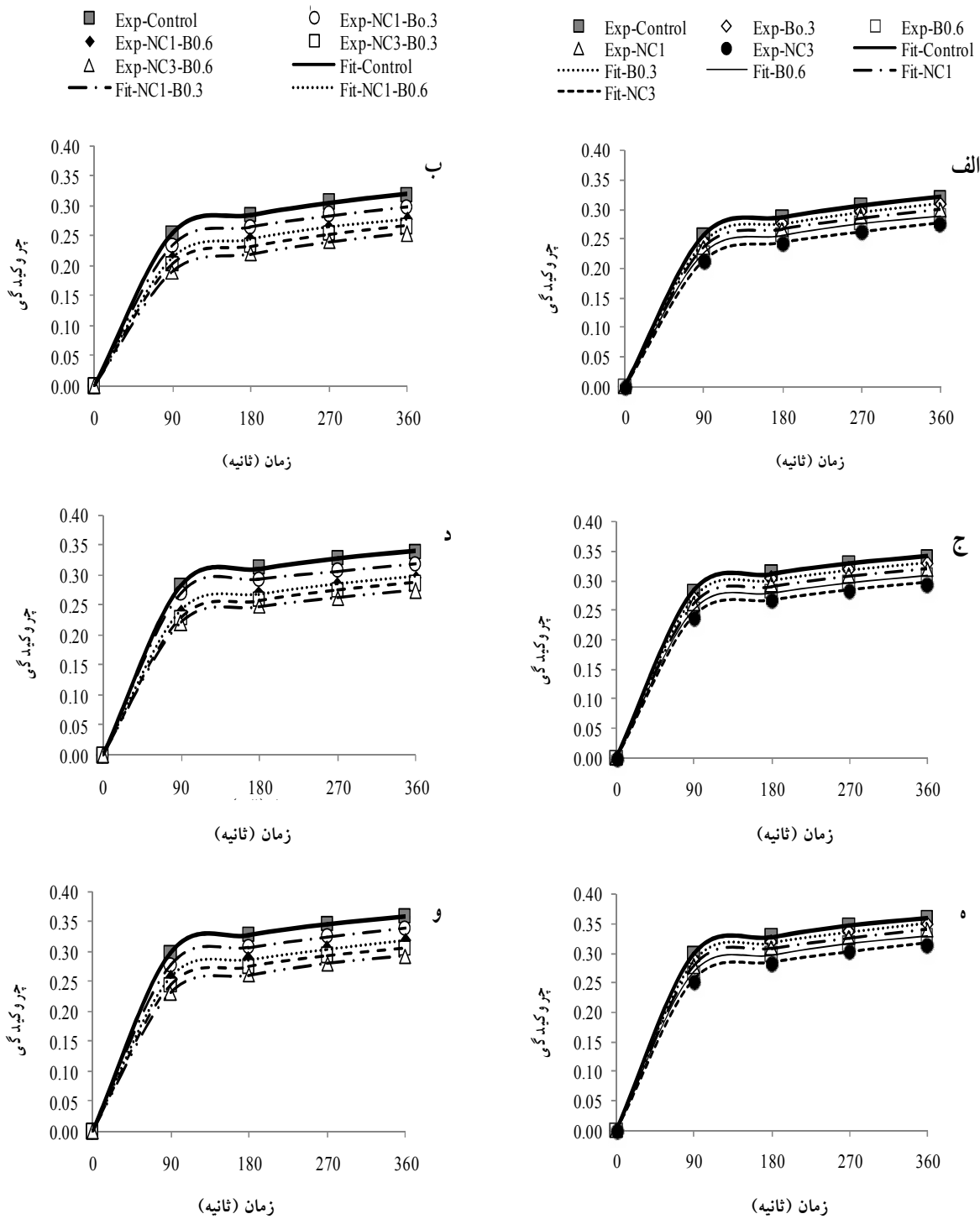
شکل ۱. میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده نمونه شاهد طی فرآیند سرخ کردن عمیق در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به صورت تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبت (ب)

می‌دهد، با پیشرفت زمان سرخ‌کردن، در تمامی نمونه‌ها، خروج رطوبت از قطعات سیب‌زمینی، باعث کاهش ضخامت و در نتیجه افزایش چروکیدگی شد. هم‌چنین، هر دو تیمار، میزان چروکیدگی نمونه‌ها را نسبت به نمونه شاهد کاهش دادند. هم‌چنین، کاهش در میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی با افزایش غلظت کلرید سدیم و بتاسیکلودکسترین معنی‌دار بود. نمونه تیمار شده با کلرید سدیم (با غلظت ۳ درصد) در مقایسه با نمونه‌های دیگر، در زمان‌های یکسان از فرآیند سرخ‌کردن، کمترین میزان چروکیدگی را داشت. کاهش میزان چروکیدگی نمونه‌های تیمار شده با بتاسیکلودکسترین نسبت به نمونه شاهد را می‌توان به کاهش میزان از دست دادن آب در اثر این تیمار در طول فرآیند نسبت داد که احتمالاً این امر ناشی از آن است که ناحیه بیرونی آب‌دوست، ساختار دو بخشی بتاسیکلودکسترین به رطوبت ماده غذایی متصل شده و از طریق افزایش کشش سطحی آن موجب کاهش میزان خروج رطوبت از ماده غذایی می‌گردد. در مورد تأثیر کلرید سدیم بر کاهش میزان چروکیدگی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد نیز چنین می‌توان استدلال نمود که کلرید سدیم در تماس با ماده غذایی به‌عنوان الکترولیت قوی عمل کرده و با جذب در لایه سطحی ماده غذایی، کشش سطحی را افزایش داده و این مسئله منجر به کاهش خروج رطوبت و در نتیجه کاهش چروکیدگی می‌گردد. شکل ۲-ب، روند تغییرات چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی

نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۱۵۰ به ۱۹۰ درجه سلسیوس، در زمان‌های یکسان از فرآیند سرخ‌کردن، میزان چروکیدگی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد؛ چرا که، در دماهای بالای فرآیند، به دلیل افزایش سرعت انتقال حرارت، میزان از دست دادن رطوبت به‌صورت بخار، بیشتر از دماهای پایین بوده، در نتیجه میزان تغییرات حجمی و چروکیدگی افزایش می‌یابد. این یافته با نتایج حاصل از تحقیقات بایک و میتال (۴) و ضیایی‌فر و همکاران (۲۸) مطابقت دارد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، میزان از دست دادن رطوبت با میزان چروکیدگی ارتباط مستقیم دارد و با گذشت زمان سرخ‌کردن، محتوای رطوبت نمونه‌ها کاهش و در نتیجه میزان چروکیدگی افزایش یافت (شکل ۱-ب). این نتیجه مطابق با نتایج به‌دست آمده توسط یامسائق سوتق و موریرا (۲۷) و ضیایی‌فر و همکاران (۲۸) می‌باشد.

تأثیر تیمارهای انجام شده بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده

شکل ۲-الف، روند تغییرات چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و در زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه را برای نمونه‌های شاهد و تیمارهای کلرید سدیم (۱ و ۳ درصد) و بتاسیکلودکسترین (۳ و ۶ گرم در لیتر) به‌صورت مجزا نشان می‌دهد. نتایج حاصله نشان



شکل ۲. تغییرات چروکیدگی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۳ جدول ۲، طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵°C (الف، ب)، ۱۷°C (ج، د) و ۱۹°C (ه، و) در تیمارهای مختلف براساس جدول ۱

از محتوای رطوبتی بدون بعد (M_1)، جذب روغن (O) و دانسیته ظاهری (ρ) پیشنهاد شده است. به دلیل عدم وجود مدل‌های تجربی مشابه در تحقیقات قبلی، تمامی مدل‌های به کار رفته، مدل‌های پیشنهادی در تحقیق حاضر می‌باشند. جدول ۳، پارامترهای آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های جدول ۲ را نشان می‌دهد. تمامی مدل‌های پیشنهادی با داشتن پارامترهای آماری مناسب (R^2 بالا و RMSE پایین)، داده‌های آزمایشی را به خوبی برازش نمودند.

علاوه بر این، شکل ۲، منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی میزان چروکیدگی نمونه‌های مختلف ذکر شده در جدول ۱ را با مدل شماره ۳ جدول ۲، در سه دمای سرخ کردن ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و پنج زمان ۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، مدل شماره ۳ به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش کرده است. هم‌چنین، در جدول ۴، ضرایب مدل‌های جدول ۲ با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، به صورت تابعی از شرایط فرآیند سرخ کردن (غلظت کلرید سدیم، غلظت بتاسیکلودکستین و دمای سرخ کردن) مدل‌سازی شدند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان میزان چروکیدگی محصول را در شرایط مختلف فرآیند، تعیین نموده و براساس آن مناسب‌ترین شرایط فرآیند را برای به دست آوردن محصولی با خصوصیات فیزیکی و کیفیت مطلوب انتخاب نمود.

معتبرسازی مدل پیشنهادی

برازش مقادیر چروکیدگی پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی ۳ (جدول ۲) با مقادیر چروکیدگی حاصل از آزمایش با غلظت بتاسیکلودکستین ۰/۴۵ گرم در لیتر و غلظت کلرید سدیم ۲ درصد نشان از انطباق خوب ($R^2 = ۰/۹۹۶۶$) بین میزان چروکیدگی این مدل و تیمار آزمایشی داشت (شکل ۳). بنابراین، مدل توسعه یافته پیشنهادی می‌تواند برای پیش‌بینی سینتیک چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده تحت شرایط مورد آزمایش، مناسب در نظر گرفته شود.

سرخ‌شده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و در زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه را برای تمام تیمارهای تلفیقی کلرید سدیم (۱ و ۳ درصد) و بتاسیکلودکستین (۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر) نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، میزان چروکیدگی در نمونه‌های تیمار شده به صورت تلفیقی، نسبت به نمونه‌های شاهد، کاهش پیدا کرد؛ به طوری که تیمارهای تلفیقی شامل کلرید سدیم با غلظت ۳ درصد و بتاسیکلودکستین با سطح غلظت ۰/۶ گرم در لیتر، دارای کمترین میزان چروکیدگی بودند؛ بعد از آن تیمارهای NC1-B0.3، NC1-B0.6، NC3-B0.3 (مطابق جدول ۱) به ترتیب چروکیدگی کمتری را نشان دادند. کاهش در میزان چروکیدگی در همه تیمارهای تلفیقی در تمام زمان‌های فرآیند سرخ کردن، نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. شکل ۲- (ج، د، ه، و)، به ترتیب، روند تغییرات چروکیدگی نمونه‌های تیمار شده در شرایط مختلف (به صورت مجزا و تلفیقی) و سپس سرخ‌شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس را با گذشت زمان نشان می‌دهد. مطابق شکل، روند داده‌های آزمایشی به دست آمده برای تیمار شاهد و تیمارهای کلرید سدیم و بتاسیکلودکستین به صورت مجزا و تلفیقی، مشابه روند داده‌های آزمایشی به دست آمده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس بود. هم‌چنین، کاهش میزان چروکیدگی در نمونه‌های تیمار شده در این دماها نیز نسبت به نمونه‌های شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. مطابق نتایج به دست آمده، در تمامی دماها، نمونه‌های تیمار تلفیقی NC3-B0.6 کمترین میزان چروکیدگی را به خود اختصاص دادند. هم‌چنین، در زمان‌های یکسان از فرآیند، میزان چروکیدگی ایجاد شده در نمونه‌های سرخ‌شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس، بالاتر از دمای ۱۵۰°C بود.

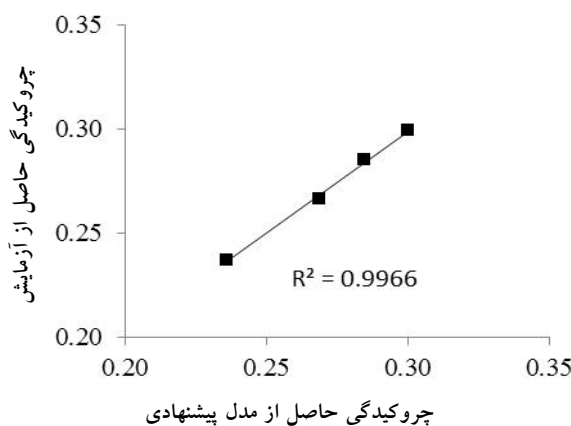
مدل‌سازی چروکیدگی

مدل‌های ۶-۱ جدول ۲، مدل‌های تجربی پیشنهادی را نشان می‌دهد که در آنها چروکیدگی به صورت تابعی از زمان مدل‌سازی شده است. علاوه بر این، سه مدل ۷، ۸ و ۹ نیز به منظور مدل‌سازی میزان چروکیدگی به ترتیب به صورت تابعی

جدول ۲. مدل‌های پیشنهادی برای مدل‌سازی میزان چروکیدگی (S_t) به صورت تابعی از زمان (t)، محتوای رطوبت بدون بعد (M_t)، جذب روغن (O) و دانسیته ظاهری (ρ) حین فرآیند سرخ کردن عمیق

| شماره مدل | مدل | مرجع |
|-----------|-----------------------------|-------------------------|
| ۱ | $S_t = (abt)/(1 + bt)$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۲ | $S_t = a(1 - \exp(-bt))$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۳ | $S_t = at^b$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۴ | $S_t = a \exp(-bt) + c$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۵ | $S_t = (1 + t)/(at + b)$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۶ | $S_t = at/(1 + bt)$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۷ | $S_t = aM_t^2 + bM_t + c$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۸ | $S_t = aO^b$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |
| ۹ | $S_t = a\rho^2 + b\rho + c$ | مدل پیشنهادی تحقیق حاضر |

به طور معنی‌داری کاهش داد. هم‌چنین، افزایش غلظت تیمار بتاسیکلودکستین از ۰/۳ به ۰/۶ گرم در لیتر و کلرید سدیم از ۱ به ۳ درصد، میزان چروکیدگی نمونه‌ها را به طور معنی‌داری کاهش داد. از طرف دیگر، تلفیق دو تیمار مذکور نیز در مقایسه با هر کدام از تیمارها به تنهایی، میزان چروکیدگی را به طور معنی‌داری کاهش داد. با این حال، در مورد اثر عوامل مؤثر بر کشش سطحی هم‌چون بتاسیکلودکستین و کلرید سدیم روی کاهش پدیده چروکیدگی طی فرآیند سرخ کردن عمیق، نیاز به تحقیقات بیشتری وجود دارد. از سوی دیگر، در این مطالعه مدل‌های مختلفی با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره با R^2 بالا و RMSE پایین به دست آمدند که تمامی مدل‌های پیشنهادی، داده‌های حاصل از آزمایش را برای همه تیمارهای مورد آزمون به خوبی برازش کردند؛ بنابراین، این مدل‌ها می‌توانند مدل‌های کاربردی و مفید جهت استفاده تحت شرایط دمایی - زمانی مختلف طی فرآیند سرخ کردن عمیق باشند. اهمیت ارائه مدل‌های تجربی، این است که با داشتن چنین مدل‌هایی، لزوم انجام آزمایشات در شرایط مختلف ذکر شده در فرآیند سرخ کردن بسیار کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳. برازش داده‌های چروکیدگی حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل پیشنهادی

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که میزان چروکیدگی در تمامی نمونه‌های مورد آزمون، با افزایش دمای سرخ کردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس افزایش یافت و این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار بود. استفاده از هر دو تیمار بتاسیکلودکستین و کلرید سدیم، چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ شده را نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری

جدول ۳. داده‌های آماری حاصل برای مدل‌های جدول ۲ در دماها و تیمارهای مختلف

| مدل ۱ | | | | | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۹۹ | | Control |
| ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۹۹ | | B0.3 |
| ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | | B0.6 |
| ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹ | | NC1 |
| ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | | NC3 |
| ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.6 |

| مدل ۲ | | | | | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۰۹۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۹۴ | ۰/۹۹ | | Control |
| ۰/۰۰۹۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۹۳ | ۰/۹۹ | | B0.3 |
| ۰/۰۰۹۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۶ | ۰/۹۹ | | B0.6 |
| ۰/۰۰۹۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۹۱ | ۰/۹۹ | | NC1 |
| ۰/۰۰۸۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۴ | ۰/۹۹ | | NC3 |
| ۰/۰۰۹۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۹۱ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۰۸۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۴ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۰۸۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۲ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۰۸۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۹ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.6 |

| مدل ۳ | | | | | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۰۰۷ | ۱ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹ | | Control |
| ۰/۰۰۰۸ | ۱ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹ | | B0.3 |
| ۰/۰۰۰۸ | ۱ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹ | | B0.6 |
| ۰/۰۰۰۸ | ۱ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹ | | NC1 |
| ۰/۰۰۰۹ | ۱ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹ | | NC3 |
| ۰/۰۰۰۸ | ۱ | ۰/۰۰۰۳ | ۱ | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۰۰۸ | ۱ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۰۰۹ | ۱ | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۰۰۹ | ۱ | ۰/۰۰۲۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۴ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.6 |

تأثیر افزودن بتاسیکلودکستین و کلرید سدیم به روغن، روی سینتیک ...

ادامه جدول ۳

مدل ۴

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | دما (°C) | تیمار |
|---------|----------------|--------|----------------|---------|----------------|----------|----------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۱۱۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۹۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۱۶ | ۰/۹۹ | | Control |
| ۰/۰۱۱۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۱۴ | ۰/۹۹ | | B0.3 |
| ۰/۰۱۱۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۰۶ | ۰/۹۹ | | B0.6 |
| ۰/۰۱۱۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۱۲ | ۰/۹۹ | | NC1 |
| ۰/۰۱۰۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۰۳ | ۰/۹۹ | | NC3 |
| ۰/۰۰۱۱۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۰۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۱۰۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۰۴ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۱۰۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۰۰ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۱۰۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۹۶ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.6 |

مدل ۵

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۰۸۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۸ | ۰/۹۹ | | Control |
| ۰/۰۰۸۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۷۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۵ | ۰/۹۹ | | B0.3 |
| ۰/۰۰۷۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۷ | ۰/۹۹ | | B0.6 |
| ۰/۰۰۷۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۲ | ۰/۹۹ | | NC1 |
| ۰/۰۰۶۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۴ | ۰/۹۹ | | NC3 |
| ۰/۰۰۷۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۸۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۶۱ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۰۶۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۴ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۰۶۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۰ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۰۵۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۷ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.6 |

مدل ۶

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۹۹ | | Control |
| ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۹۹ | | B0.3 |
| ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | | B0.6 |
| ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹ | | NC1 |
| ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | | NC3 |
| ۰/۰۰۳۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.6 |

ادامه جدول ۳

مدل ۷

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۱۲۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۳۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۰۷ | ۰/۹۸ | | Control |
| ۰/۰۱۲۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۱۶ | ۰/۹۸ | | B0.3 |
| ۰/۰۱۵۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۶۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۵۵ | ۰/۹۷ | | B0.6 |
| ۰/۰۱۵۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۳۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۴۷ | ۰/۹۸ | | NC1 |
| ۰/۰۱۵۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۱۷۷ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۹۵ | ۰/۹۶ | | NC3 |
| ۰/۰۲۰۳ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۷۵ | ۰/۹۷ | ۰/۰۳۹۷ | ۰/۹۴ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۲۱۲ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۳۶ | ۰/۹۸ | ۰/۰۴۲۰ | ۰/۹۳ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۲۶۲ | ۰/۹۷ | ۰/۰۳۰۴ | ۰/۹۶ | ۰/۰۴۶۹ | ۰/۹۱ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۲۴۴ | ۰/۹۷ | ۰/۰۳۸۴ | ۰/۹۴ | ۰/۰۵۲۹ | ۰/۹۵ | | NC3-B0.6 |

مدل ۸

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۰۲۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۱۰ | ۱ | | Control |
| ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۹۹ | | B0.3 |
| ۰/۰۰۲۵ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۹ | | B0.6 |
| ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۹۹ | | NC1 |
| ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۷ | ۰/۹۹ | | NC3 |
| ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۴ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۰۴۶ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۴۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۰۷۱ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۰ | ۰/۹۹ | ۰/۰۰۵۱ | ۰/۹۹ | | NC3-B0.6 |

مدل ۹

| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | دما (°C) | تیمار |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|----------|----------|
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | | |
| ۰/۰۲۸۶ | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۴۸ | ۰/۹۸ | ۰/۰۳۱۳ | ۰/۹۷ | | Control |
| ۰/۰۳۲۵ | ۰/۹۷ | ۰/۰۲۸۶ | ۰/۹۷ | ۰/۰۳۵۹ | ۰/۹۶ | | B0.3 |
| ۰/۰۳۵۸ | ۰/۹۶ | ۰/۰۳۳۲ | ۰/۹۶ | ۰/۰۴۲۳ | ۰/۹۴ | | B0.6 |
| ۰/۰۳۲۳ | ۰/۹۷ | ۰/۰۲۸۷ | ۰/۹۷ | ۰/۰۳۵ | ۰/۹۶ | | NC1 |
| ۰/۰۴۰۳ | ۰/۹۵ | ۰/۰۳۸۷ | ۰/۹۵ | ۰/۰۴۶۷ | ۰/۹۱ | | NC3 |
| ۰/۰۴۰۳ | ۰/۹۶ | ۰/۰۴۲۹ | ۰/۹۵ | ۰/۰۴۷۵ | ۰/۹۲ | | NC1-B0.3 |
| ۰/۰۴۳۵ | ۰/۹۴ | ۰/۰۴۲۰ | ۰/۹۴ | ۰/۰۵۳۸ | ۰/۸۹ | | NC1-B0.6 |
| ۰/۰۴۹۰ | ۰/۹۲ | ۰/۰۵۳۹ | ۰/۸۹ | ۰/۰۵۴۰ | ۰/۸۷ | | NC3-B0.3 |
| ۰/۰۴۹۹ | ۰/۹۲ | ۰/۰۴۵۶ | ۰/۹۲ | ۰/۰۴۴۷ | ۰/۹۱ | | NC3-B0.6 |

تعریف علائم اختصاری تیمارهای مختلف، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۴. مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها

| | |
|--------|--|
| R^2 | $S_t = (abt)/(1+bt)$ |
| ۰/۹۹۶۴ | $a = - ۰/۰۱۱۴۷NC - ۰/۰۳۱۲۹B + ۰/۰۰۲۰۸۶T$ |
| ۰/۹۹۰۴ | $b = - ۰/۰۰۱۶۵NC - ۰/۰۰۵۰۶B + ۰/۰۰۰۲۰۹T$ |
| R^2 | $S_t = a(1 - \exp(-bt))$ |
| ۰/۹۹۷۲ | $a = - ۰/۰۱۱۸۲NC - ۰/۰۳۳۲۹B + ۰/۰۰۱۹۰۶T$ |
| ۰/۹۹۵۲ | $b = - ۰/۰۰۰۴۳NC - ۰/۰۰۱۱۳B + ۰/۰۰۰۱۱۴T$ |
| R^2 | $S_t = at^b$ |
| ۰/۹۹۴۹ | $a = - ۰/۰۱۰۱۴NC - ۰/۰۳۱۸۷B + ۰/۰۰۰۸۵۸T$ |
| ۰/۹۶۷۳ | $b = ۰/۰۰۹۱۷۱NC + ۰/۰۳۴۰۵۵B + ۰/۰۰۰۷۹۱T$ |
| R^2 | $S_t = a \exp(-bt) + c$ |
| ۰/۹۹۷۲ | $a = ۰/۰۱۱۸۴۸NC + ۰/۰۳۳۳۹B - ۰/۰۰۱۹ T$ |
| ۰/۹۹۵۲ | $b = - ۰/۰۰۱۱۳NC - ۰/۰۰۱۱۳B + ۰/۰۰۰۱۱۴T$ |
| ۰/۹۹۷۲ | $c = - ۰/۰۱۱۸۲NC - ۰/۰۳۳۲۷B + ۰/۰۰۱۹۰۶T$ |
| R^2 | $S_t = (1+t)/(at+b)$ |
| ۰/۹۸۲۷ | $a = ۰/۱۵۴۳۰۹NC + ۰/۵۶۱۴۷۷B + ۰/۰۱۵۲۴۵T$ |
| ۰/۹۹۵۲ | $b = - ۰/۰۰۰۴۳NC - ۰/۰۰۱۱۳B - ۰/۰۳۸۰۴T$ |
| R^2 | $S_t = at/(1+bt)$ |
| ۰/۹۸۰۶ | $a = ۰/۱۸۰۸۶۵NC + ۱/۱۰۶۳۹۱B + ۰/۰۲۹۳۰۱T$ |
| ۰/۹۵۰۷ | $b = ۱۱/۳۶۹۷۳NC + ۳۹/۸۰۳۹۷B + ۰/۴۶۰۲۹۸T$ |
| R^2 | $S_t = aM_t^2 + bM_t + c$ |
| ۰/۹۳۱۵ | $a = - ۰/۱۳۸۰۶NC - ۰/۳۷۲۱۱B - ۰/۰۰۳۵۷T$ |
| ۰/۹۳۶۴ | $b = ۰/۲۱۲۵۴۳NC + ۰/۸۷۰۹۲۵B + ۰/۰۰۱۶۸۹T$ |
| ۰/۹۰۰۵ | $c = - ۰/۰۷۹۰۱NC - ۰/۳۰۲۴۲B + ۰/۰۰۱۸۳۳T$ |
| R^2 | $S_t = aO^b$ |
| ۰/۹۸۵۱ | $a = - ۰/۰۱۶۵۳NC - ۰/۰۸۶۱۵B + ۰/۰۰۴۳۴۸T$ |
| ۰/۹۷۴۵ | $b = ۰/۰۰۳۵۲۸NC - ۰/۰۱۳۸۹B + ۰/۰۰۲۳۸۱T$ |
| R^2 | $S_t = ap^2 + bp + c$ |
| ۰/۹۶۰۵ | $a = - ۰/۴۲۲۳۱NC - ۱/۵۸۰۱۱B - ۰/۰۱۰۵۴T$ |
| ۰/۹۵۸۶ | $b = ۰/۲۶۱۰۰۶NC + ۰/۹۷۱۸۸۵B + ۰/۰۱۷۵۸۵T$ |
| ۰/۹۱۹۸ | $c = - ۰/۱۸۳۶۷NC - ۰/۶۶۴۳۶B + ۰/۰۰۳۷۹T$ |

NC، B و T به ترتیب نشان‌دهنده غلظت کلرید سدیم، غلظت بتاسیکلودکستین و دمای سرخ کردن می‌باشد.

منابع مورد استفاده

1. Al-Muhtaseb, A. H., W. A. M. McMinn and T. R. A. Magee. 2004. Shrinkage, density and porosity variations during the convective drying of potato starch gel. *In: Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS)*. Sao Paulo, Brazil. Volume C, pp. 1604-1611.
2. AOAC. 1995. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
3. Baik, O. D. and G. S. Mittal. 2003. Kinetics of tofu color changes during deep fat frying. *Lwt - Food Science and Technology* 36: 43-48.
4. Baik, O. D. and G. S. Mittal. 2005. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep fat tofu frying. *Food Research International* 38: 183-191.
5. Bouchon, P. 2009. Understanding oil absorption during deep-fat frying. *Advances in Food and Nutrition Research* 57: 209-234.
6. Bravo, J., N. Sanjuan, J. Ruales and A. Mulet. 2009. Modeling the Dehydration of Apple Slices by Deep Fat Frying. *Drying Technology* 27: 782-786.
7. Duran, M., F. Pedreschi, P. Moyano and E. Troncoso. 2007. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering* 81: 257-265.
8. Farinu, A. and O. D. Baik. 2008. Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweet potato. *Journal of Food Engineering* 89: 187-194.
9. Garayo, J. and R. Moreira. 2002. Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering* 55: 181-191.
10. Greenfield, H., J. Makinson and R. B. H. Wills. 1984. Lipids in French fries: a retail and laboratory study. *International Journal of Food Science & Technology* 19: 239-245.
11. Hernandez, J. A., G. Pavon and M. A. Garcia. 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 45: 1-10.
12. Krokida, M. K., V. Oreopoulou and Z. B. Maroulis. 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering* 44: 39-46.
13. Krokida, M. K., V. Oreopoulou, Z. B. Maroulis and D. Marinos-Kouris. 2001. Deep fat frying of potato strips- Quality Issues. *Drying Technology* 19: 879-935.
14. Kawas, M. L. and R. G. Moreira. 2001. Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering* 47: 97-107.
15. Marcus, Y. 2010. Surface Tension of Aqueous Electrolytes and Ions. *Journal of Chemical & Engineering Data* 55: 3641-3644
16. Martin Del Valle, E. M. 2004. Cyclodextrins and their uses: a review. *Process Biochemistry* 39: 1033-1046.
17. Mayor, L. and A. M. Sereno. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61: 373-386.
18. Miranda, M. L. and J. M. Aguilera. 2006. Structure and texture properties of fried potato products. *Food Reviews International* 22: 73-201.
19. Mir-Bel, J., R. Oria and M. L. Salvador. 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering* 95: 416-422.
20. Mottur, G. P. 1989. A scientific look at potato chips – the original savory snack. *Cereal Foods World* 34: 620-626.
21. Steel, R. G. D., J. H. Torrie and D. A. Dickey. 1996. Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach. McGraw-Hill, New York.
22. Taiwo, K. A. and O. D. Baik. 2007. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *Lwt - Food Science and Technology* 40: 661-668.
23. Trystram, G. 2012. Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering* 110: 269-277.
24. Varela, G., A. E. Bender and I. D. Morton. 1988. Frying of Food Principles, Changes, New Approaches. VCH, New York.
25. Wang, N. and J. G. Brennan. 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering* 24: 61-76.
26. Yadollahinia, A. and M. Jahangiri. 2009. Shrinkage of potato slices during drying. *Journal of Food Engineering* 94: 52-58.
27. Yamsaengsung, R. and R. G. Moreira. 2002. Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying: Part I: Model development. *Journal of Food Engineering* 53: 1-10.
28. Ziaiiifar, A. M. F. Courtois and G. Trystram. 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering* 33: 191-212.
29. Ziaiiifar, A. M., N. Achir, F. Courtois, I. Trezzani and G. Trystram. 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: 1410-1423.